



Jalle Bäcklund

Geotekninen monitorointi Suomessa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 29.04.2013

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: DI Jaakko Heikkilä

Tekijä Jalle Bäcklund		
Työn nimi Geotekninen monitorointi Suomessa		
Laitos Rakennustekniikka		
Professuuri Pohjarakennus ja maamekaniikka	Professuurikoodi Rak-50	
Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu		
Työn ohjaaja(t)/Työntarkastaja(t) DI Jaakko Heikkilä		
Päivämäärä 29.04.2013	Sivumäärä 94 + 12	Kieli suomi

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli selvittää monitoroinnin ohjeistusta ja siihen käytettäviä menetelmiä maailmalla sekä käytäntöjä Suomessa. Kirjallisuudessa on selvitetty geotekniseen monitorointiin liittyviä yleisiä asioita, hyötyjä ja rajoitteita sekä kuvattiin monitorointi prosessina. Myös monitoroinnin liittymistä rakentamishankkeeseen ja sen vaiheistusta selvitettiin. Työn aiheeseen liittyviä standardeja käsiteltiin Euroopan ja Yhdysvaltojen osalta. Mittausmenetelmistä on esitelty tavallisimpia geoteknisessä monitoroinnissa käytettäviä laitteistoja ja niiden tyypilliset käyttökohteet. Suomen monitoroinnin kehitys ja käytännöt selvitettiin haastattelulla. Työssä tutkittiin myös monitoroinnin käyttöä geoteknisten rakentamiskohteiden yhteydessä Suomessa. Esimerkkikohteet valittiin siten, että ne edustaisivat tyypillisesti käytettyjä mittausmenetelmiä. Kohteet ovat enintään muutaman vuoden vanhoja ja edustavat siten monitoroinnin nykytilaa Suomessa. Kohteiden tarkastelun tärkeimpiä osa-alueita olivat mittauksen tavoite, käytetyt mittausmenetelmät sekä mittauksen onnistuminen ja asetettujen tavoitteiden toteutuminen.

Kirjallisuudessa perusteella havaittiin, että monitorointiin liittyvä ohjeistus on vielä vähäistä, mutta Euroopan kattava monitorointistandardi on valmistumassa. Yleisestikin suunnittelijoita ohjeistavia julkaisuja on vähän. Tavallisesti monitorointi on mielletty riskien pienentämisen välineeksi, mutta EN 1997-1 sallii myös seurantamenetelmän käytön. Seurantamenetelmässä monitoroinnilla pyritään aktiivisesti kustannussäästöihin pienempien rakenteellisten varmuuksien avulla. Mittauksilla ohjataan tällöin rakentamista ja varmistetaan, ettei turvallisuus vaarannu.

Työn perusteella havaittiin, että monitoroinnin suunnittelu on syytä yhdistää rakennushankkeen suunnitteluun, jolloin monitoroinnin edellytykset pystytään huomioimaan. Mittauslaitteiden ja -tulosten luotettavuus voi olla ongelma ja se tulee varmistaa ainakin kriittisissä mittauspisteissä. Tarvittaessa muutosten suuruudelle tulee asettaa hälytysrajat. Työn perusteella voitiin havaita myös, että Suomessa monitoroinnin painoarvo on vähäinen verrattuna muuhun Eurooppaan, osittain erilaisesta maa- ja kallioperästä johtuen. Toisaalta Suomi on maailman kehityksen kärjessä esimerkiksi tietyissä automaattisissa mittaussovellutuksissa. Nykyään monitoroinnin edistämisen suurin este on suunnittelijoiden vähäinen ymmärrys ja kokemus monitorointiin liittyen. Monitoroinnin hyötyjä pitäisi pyrkiä tuomaan paremmin suunnittelijoiden tietoisuuteen.

Avainsanat Geotekniikka, maarakenne, tarkkailumittaus, erikoismittaus, seuranta, instrumentointi, monitorointi, seurantamenetelmä

Author Jalle Bäcklund		
Title of thesis Geotechnical monitoring in Finland		
Department Civil and Structural Engineering		
Professorship Soil Mechanics and Foundation Engineering	Code of professorship Rak-50	
Thesis supervisor Professor Leena Korkiala-Tanttu		
Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) M. Sc. Jaakko Heikkilä		
Date 29.04.2013	Number of pages 94 + 12	Language Finnish

Abstract

The purpose of this study was to examine the monitoring guidelines and the methods used around the world, as well as practices in Finland. The literal part clarifies the benefits and limitations of monitoring, as well as describes the monitoring process. The work is also carried out to present the connection to construction project and the phasing of monitoring in a construction project. Monitoring standards are discussed in Europe and the United States. The measurement methods used in monitoring of the most common geotechnical installations and their typical applications are presented. Finnish monitoring developments and practices have been explained in an interview. The use of geotechnical monitoring in construction sites in Finland was also studied. Example sites have been selected so that they represent the current state of monitoring and the typical measuring methods in Finland. Sites are no more than a few years old, and thus represent the current state of geotechnical monitoring in Finland. The key elements of example sites are the purpose of the measurements, the measuring methods used, as well as success of measurements and the realization of the objectives set.

According to the literature research and interview, the availability of monitoring guidelines is still limited, but the Europe-wide monitoring standard is about to complete. In general, publications instructive for designers are limited. Typically, monitoring is seen as a risk management tool, but the EN 1997-1 also allows the use of the observational method. In observational method monitoring has an active role in pursuing cost savings through lower factor of safety. Measurements are used to ensure that the safety is not compromised.

This study showed that the planning of monitoring should be combined with the design of the construction project in order to ensure that the monitoring requirements can be taken into account. Reliability of the measuring equipment and the results can be a problem and needs to be confirmed, at least for critical measurement points. If considered necessary, alarm limits should be set for magnitude of change. According to the study it could be observed that the importance of monitoring is low in Finland compared to rest of Europe, in part due to a different quality of soil and bedrock. On the other hand, Finland is at the leading edge of the world, for example in certain automated measurement applications. Today, the biggest obstacle of monitoring is the designers' limited understanding and experience related to monitoring. The benefits of monitoring should be brought into awareness of the designers.

Keywords Geotechnical, instrumentation, monitoring, observational method

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopistossa Suomen Geoteknillisen yhdistyksen Monitorointitoimikunnan toimeksiannosta. Työn valvojana toimi Aalto-yliopiston Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitokselta Georakentamisen professori Leena Korkiala-Tanttu ja ohjaajana diplomi-insinööri Jaakko Heikkilä Insinööritoimisto Arcus Oy:stä.

Työn rahoittajina toimivat Liikennevirasto, Lemminkäinen Infra Oy, Skanska Infra Oy, Helsingin kaupunki (Stara), Helsingin Satama, RoadScanners Oy ja FinMeas Oy. Kiitos kaikille rahoittajille tämän työn mahdollistamisesta.

Diplomityön ohjausryhmään kuuluivat:

Erkki Mäkelä	Liikennevirasto
Leena Korkiala-Tanttu	Aalto-yliopisto
Jaakko Heikkilä	Insinööritoimisto Arcus Oy
Sami Ylönen	FinMeas Oy
Hannu Halkola	Helsingin kaupunki
Kalle Rantala	Helsingin kaupunki
Mika Silvast	RoadScanners Oy
Hannu Kärki	Helsingin Satama
Miika Kostamo	Geotrim Oy
Heikki Luomala	Tampereen teknillinen yliopisto
Pauli Saksa	Geosto Oy

Haluan kiittää kaikkia työssä avustaneita kommenteista, materiaalista sekä neuvoista, joita olen työn aikana saanut.

Espoo 29.04.2013

Jalle Bäcklund

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo	1
Lyhenteet.....	4
Määritelmät	5
1 Johdanto	6
2 Yleiskuvaus monitoroinnista.....	8
2.1 Monitoroinnin lähtökohdat.....	8
2.2 Monitoroinnin tavoitteet ja hyödyt.....	9
2.2.1 Hyödyt rakentamisvaiheen mukaan	9
2.2.2 Rakenteen toiminnan arviointi	9
2.2.3 Oikeudellinen turva.....	11
2.2.4 Rakentamisen ohjaus.....	11
2.3 Seurantamenetelmä	12
2.4 Haasteita	13
3 Monitorointiprojekti.....	14
3.1 Liittyminen geotekniseen suunnitteluun ja rakentamiseen.....	14
3.2 Monitoroinnin suunnittelu	15
3.2.1 Alustava suunnittelu.....	15
3.2.2 Luonnossuunnittelu	16
3.2.3 Tarkennettu suunnitelma.....	18
3.3 Asennus ja mittausten suoritus	18
3.4 Mittaustulosten käsittely.....	20
3.4.1 Käsittely ja tulkinta	20
3.4.2 Esitystavat	22
3.5 Raportointi.....	22
3.6 Vastuunjako.....	23
3.7 Mittausten automatisointi	24
3.8 Kustannukset	25
4 Standardit	26
4.1 EN 1997-1 ja seurantamenetelmä.....	26
4.2 CEN-WI 00341066.....	26
4.3 Saksa.....	26
4.4 Suomi & pohjoismaat.....	27
4.5 Yhdysvallat.....	27
5 Monitorointi Suomessa	28

5.1	Nykytilanne	28
5.2	Käytetyimmät mittausten menetelmät	29
6	Mittausten menetelmien kuvaukset	31
6.1	Pysty- ja vaakasiirtymät	31
6.1.1	Inklinometri	31
6.1.2	Vaaitus	32
6.1.3	Takymetri	33
6.1.4	Painumalevy	33
6.1.5	Painumaletku	34
6.1.6	Ekstensometri	34
6.1.7	Laserkeilaus	35
6.1.8	Interferometri mittaus	35
6.1.9	GNSS-satelliittimittaus	36
6.1.10	Kaapelitutkamittaus	36
6.1.11	Fibre Bragg Grating -valokuituanturi	37
6.1.12	SOFO-valokuituanturi	38
6.1.13	Fabry-Perot-interferometrianturi	39
6.1.14	Brillouinsirontaan perustuva valokuituanturi	39
6.2	Pohjavesimittaukset	39
6.2.1	Yleiskuvaus	39
6.2.2	Pohjaveden korkeuden havaintoputki	40
6.2.3	Standpipe -huokospainemittari	40
6.3	Huokospainemittaukset	41
6.3.1	Yleiskuvaus	41
6.3.2	Pneumaattinen huokospainemittari	41
6.3.3	Sähköiset huokospainemittarit	42
6.4	Maanpaineen mittaus	43
6.5	Voima-anturi	44
6.6	Lämpötilamittaukset	45
6.7	Tärinän mittaus	47
6.8	Muita mittaustapoja	47
6.8.1	Venymäliuska-anturi	47
6.8.2	Maatutka	48
6.8.3	Palautuvan siirtymän mittaaminen kiihtyvyyssantureilla	48
6.8.4	Muita mittausten menetelmiä lyhyesti	48
7	Monitorointikohteet	50
7.1	Luoman seisake	50
7.1.1	Kohteen esittely	50
7.1.2	Mittausten menetelmät	50
7.1.3	Mittaustulokset	54

7.1.4	Mittausten toimivuus ja luotettavuus	56
7.1.5	Tavoitteiden toteutuminen	57
7.2	Mäenkyän -ratapehmeikkö	57
7.2.1	Kohteen esittely	57
7.2.2	Mittausmenetelmät ja -tulokset	59
7.2.3	Mittausten toimivuus ja luotettavuus	62
7.2.4	Tavoitteiden toteutuminen	64
7.3	Valtatien 7 parantaminen Koskenkylä–Kotka	64
7.3.1	Kohteen esittely	64
7.3.2	Mittausmenetelmät ja -tulokset	65
7.3.3	Mittausten toimivuus ja luotettavuus	67
7.3.4	Tavoitteen toteutuminen	68
7.4	Jätkäsaaren putkiponttiseinä	68
7.4.1	Kohteen esittely	68
7.4.2	Mittausmenetelmät	69
7.4.3	Mittaustulokset	71
7.4.4	Mittausten toimivuus ja luotettavuus	73
7.4.5	Tavoitteiden toteutuminen	75
7.5	Esimerkki laserkeilaustulosten visualisoinnista	75
8	Kokemukset kohteista	77
9	Yhteenveto ja johtopäätökset	83
9.1	Yhteenveto	83
9.2	Johtopäätökset	84
	Lähdeluettelo	86
	Haastatteluluettelo	93
	Liiteluettelo	94

Lyhenteet

CEN	European Committee for Standardization
FBG	Fibre Bragg Grating
GBInSAR	Ground based InSAR
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Global Positioning System
IBIS	Image by Interferometric Survey
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
LIDAR	Light Detection And Ranging
SAR	Synthetic Aperture Radar
SGY	Suomen geoteknillinen yhdistys
TDR	Time Domain Reflectometry

Määritelmät

Geotekninen monitorointi

Maan käyttäytymisen tai geoteknisten rakenteiden toiminnan seuranta rakentamista ennen, sen aikana ja/tai jälkeen (SFS-EN 1997-1 2004). Monitorointi käsittää mittaamisen lisäksi mittausten suunnittelun ja tulosten analysoinnin.

Geotekninen monitorointiohjelma

Suunniteltavissa oleva monitorointiprojektin kokonaisuus

Geotekninen monitorointiprojekti

Tiettyssä rakentamisprojektissa monitorointiin liittyvien asioiden ja prosessien kokonaisuus

Monitorointi (synonyymejä)

Tarkkailumittaus, erikoismittaus, seuranta

Seurantamenetelmä (Observational method)

EN 1997-1 sallima suunnittelumenetelmä, joka tarkoittaa jatkuvaa ja hallittua suunnittelua, työn valvontaa, monitorointia ja arviointia, mikä mahdollistaa ennalta määriteltyjen muutosten tekemisen rakentamisen aikana tai sen jälkeen. Tavoitteena on suurempi kustannustehokkuus turvallisuutta vaarantamatta.

1 Johdanto

Rakenteen vaurioituminen, joka johtuu maaperään ja kuormiin liittyvistä epävarmuustekijöistä, voi aiheuttaa vakavia seurauksia. Vaikutukset kohdistuvat rakennuskohteeseen, viereisiin rakenteisiin ja ihmisiin sekä voivat viivästyttää hanketta, lisätä kustannuksia ja johtaa oikeudenkäyntiin. (Marr 2007.)

Geoteknisen monitoroinnin avulla tutkitaan maan tai maarakenteen käyttäytymistä rakentamisen yhteydessä tai sen jälkeen. Monitoroinnilla pyritään osoittamaan kiinnostuksen kohteena olevan rakennuskohteen hyväksyttävä käyttäytyminen, jolloin rakenteen kestävyys ja turvallisuus voidaan varmistaa. Tavallisempi tapa on ollut lisätä rakenteen kestävyyttä siten, että mahdolliset oletuksista poikkeavat kuormitukset eivät aiheuta vaurioita.

SGY:n Monitorointitoimikunta on perustettu 2011 ja sen päätavoitteena on geoteknisen monitoroinnin edistäminen Suomessa. Tämä diplomityö liittyi monitorointitoimikunnan tavoitteeseen monitorointiin liittyvästä tiedonkeruusta. Diplomityön tavoitteena oli selvittää monitorointimenetelmiä ja -käytäntöjä maailmalla ja Suomessa, minkä perusteella Monitorointitoimikunta voisi päättää jatkotoimenpiteistä.

Tässä työssä tutkittiin maarakenteiden monitorointia ja sillä saavutettavia hyötyjä. Mittauksista on käsitelty myös niiden vaiheistusta rakennushankkeessa. Monitorointia on tutkittu ja käsitelty Suomessa verrattain vähän ja suomenkielistä kirjallisuutta ei ole juurikaan saatavilla. Tämän diplomityön tavoitteena oli luoda yleiskuvaus monitoroinnista ja sen nykytilasta. Monitoroinnista oli tavoitteena selvittää kirjallisuustutkimuksen avulla käytettävät menetelmät, monitorointiprosessin kulku sekä tulosten tulkinta ja hyödyntäminen. Lisäksi tavoitteena oli selvittää Suomen monitoroinnin nykytila.

Työ pohjautuu pääosin kirjallisuuteen, jota on täydennetty asiantuntijahaastatteluin. Työn loppuosassa on käsitelty muutamia monitorointikohteita Suomessa. Kohteiden tavoitteena on ollut tuoda esille Suomessa tyypillisesti käytettäviä menetelmiä ja muutamia erityyppisiä rakenteita.

Monitorointi on valittu tässä työssä pääasiallisesti käytettäväksi termiksi, mutta sitä voidaan pitää yhteneväisenä suomenkielisten sanojen tarkkailumittaus ja erikoismittaus kanssa. SFS-EN 1997-1 käyttää samasta asiasta termiä seuranta. Monitorointi käsittää mittaamisen lisäksi mittausten suunnittelun ja tulosten analysoinnin. Tässä työssä termiä tarkkailumittaus on käytetty myös pelkästään mittauksiin ja mittauslaitteiden käyttöön liittyvissä yhteyksissä.

Työssä monitoroinnin on ajateltu olevan aikaan sidottu ja termillä monitorointi viitataan tutkimuksiin, jotka perustuvat useisiin mittauskertoihin, jotka on tehty samasta mittauspisteestä. Tässä työssä käsitellyt menetelmät ovat pääosin toistuviin mittauksiin käytettäviä, mutta osa menetelmistä soveltuu lisäksi kertaluontoiseen mittaukseen. Työssä ei ole käsitelty ympäristögeotekniikkaan liittyviä mittauksia.

2 Yleiskuvaus monitoroinnista

2.1 *Monitoroinnin lähtökohdat*

Geoteknisten rakenteiden suunnittelun, rakentamisen ja korjaamisen yhteydessä tietoa maa- ja kallioperästä on rajoitetusti, eikä kaikkea tarpeellista tietoa ole mahdollista saada (Marr 2007). Maaperän ominaisuuksia voidaan harvoin pitää yhtenäisinä, mikä poikkeaa useimmista muista rakentamisessa käytettävistä materiaaleista (USACE 1995). Laboratorio- ja kenttäkokeista voidaan määrittää materiaalin ominaisuudet, mutta näitä ei voida pitää tarkkoina arvoina (Dunnicliff 1988). Ne kuitenkin kuvastavat maaperän todellista tilannetta ja ominaisuuksia. Ominaisuudet voivat myös muuttua merkittävästi tutkitun pisteen vieressä, mikä voi johtua myös aiemmista kohteessa tehdyistä töistä. Myös rakenteeseen vaikuttavien kuormien suuruuden määrittäminen voi olla ongelmallista. (Marr 2007.)

Suunnittelijan tehtäväksi jää valita suunnittelussa käytettävät parametrien arvot, jotka usein edustavat todennäköisimpinä pidettyjä arvoja (Dunnicliff 1988). Suunnittelija käyttää näitä tietoja määrittääkseen rakenteen käyttäytymisen. Tämä johtaa siihen, että suunnittelija ei pysty tarkasti määrittämään todellista rakenteen toimintaa. Ylimoitettut rakenteet vähentävät epävarmuustekijöiden vaikutuksia, mutta kasvattavat kustannuksia. Ylimoituksen kustannuksia ei haluttaisi maksaa, mutta myöskään ylimääräiset riskit eivät ole sallittavia. (Marr 2007.)

Monitoroinnilla ei voida varmistaa ongelmattonta suunnitelmaa, rakennetta tai taata rakenteen pitkää huoltovapaata käyttöaikaa (USACE 1995). Monitoroinnin avulla voidaan rakentamisen yhteydessä arvioida suunnitelmaa, sen toteutumista ja tarvittaessa korjata suunnittelussa käytettyjä parametreja (Dunnicliff 1988). Monitorointi tuottaa mitattua ja numeerista tietoa rakenteen todellisesta käyttäytymisestä. Kun mittaustuloksia verrataan ennakoituun käyttäytymiseen, nähdään epävarmuustekijöiden vaikutus. Tarvittaessa rakenteeseen voidaan tehdä muutoksia, jos mittaustulosten perusteella arvioituna rakenteen käyttäytyminen tai muutosten kehitys ei ole hyväksyttävissä rajoissa. Mittaukset eivät itsessään muuta lopputulosta. Mittaustuloksia voidaan pitää osoituksena rakenteen ja maaperän todellisesta toiminnasta. Monitorointi on työkalu, jonka tulosten tulkinnan perusteella voidaan suorittaa toimenpiteitä, jotka muuttavat lopputulosta. (Marr 2007.) Geotekniikassa monitoroinnilla on suurempi rooli kuin monissa muissa rakentamisen aloilla, sillä maaperän ominaisuudet eivät ole vakioita, kuten monien muiden rakentamisessa käytettävien materiaalien ominaisuudet (USACE 1995).

2.2 Monitoroinnin tavoitteet ja hyödyt

2.2.1 Hyödyt rakentamisvaiheen mukaan

Monitorointia varten tehtävät mittaukset voidaan jakaa kolmeen osaan rakentamisvaiheen mukaisesti: (Dunnicliff 1988)

- suunnitelmia varten tehty tutkimus
- rakennusaikainen monitorointi
- rakentamisen jälkeinen monitorointi.

Ennen rakentamista tehtyjen tutkimusten tarkoituksena on osoittaa suunniteltujen ratkaisujen riittävyys ja toimivuus. Tässä vaiheessa mittauksilla selvitetään maaperän ominaisuuksia ja arvioidaan rakenteen toimintaa saatujen tulosten avulla. Uuden tyyppisten rakenteiden yhteydessä ja vaikeissa olosuhteissa suunnitteluparametrien määrittäminen on erityisen tärkeää, jolloin elementtilaskennalla voidaan mallintaa suunnitteluratkaisuja. (Arsenio et al. 2009.)

Seurannan hyödyt rakennusaikana ovat turvallisuuden varmistaminen, kustannusten pienentäminen seurantamenetelmässä, rakentamisen ohjaus, oikeudellisen turvan lisääminen ja alan osaamisen kehittäminen (Dunnicliff 1988).

Rakentamisen jälkeinen monitorointi voi olla tarpeellista, mikäli se parantaa turvallisuutta tai merkittävästi lisää rakenteen elinikää (Dunnicliff 1988). Rakenteiden kunnan monitorointi on pitkäaikaista monitorointia, jonka tarkoituksena on varmistaa rakenteen kunnan säilyminen myös vaihtelevissa olosuhteissa (Arsenio et al. 2009). Rakentamisen jälkeisen monitorointijakson pituuteen vaikuttavat lisäksi rakentamisen aikana tehdyt havainnot. Jos rakenne voi vaikuttaa merkittävästi ympäristöönsä tai rakenteen murtuminen aiheuttaa epätavallisen suuren riskin, monitorointia tulee jatkaa 10 vuoden tai koko rakenteen eliniän ajan. (SFS-EN 1997-1 2004.)

2.2.2 Rakenteen toiminnan arviointi

Rakenteen vaurioihin johtavia syitä ovat ylikuormitus, suunnittelu- ja rakennusvirheet, suunnitelmista poikkeavat olosuhteet, rakenteiden tai rakenneosien heikentyminen tai tahalliset toimet. Monitorointi voi vähentää riskejä, jotka aiheutuvat rakenteen tai maaperän odottamattomasta ja haitallisesta käyttäytymisestä (Taulukko 1). Tavallisimmat riskit ovat loukkaantumiset, ihmishenkien menetys ja rahalliset vahingot. (Marr 2007.) Monitoroinnilla voidaan varmistaa, että rakenteen toiminta on suunnitelmien mukaista ja rakenne toimii myös rakentamisen jälkeen oletetulla ja vaaditulla tavalla. (SFS-EN 1997-1 2004.)

Taulukko 1. Monitoroinnin tavoitteet (Marr 2007).

-
1. Osoittaa kehittyvä vaurio
 2. Antaa varoitus
 3. Ilmaista tuntemattomat tekijät
 4. Arvioida kriittiset suunnittelussa käytetyt oletukset
 5. Arvioida urakoitsijan käyttämiä menetelmiä
 6. Pitää viereisiin rakenteisiin aiheutuvat vauriot mahdollisimman vähäisinä
 7. Ohjata rakentamista
 8. Ohjata toimintaa
 9. Suunnitella korjaavat toimenpiteet
 10. Parantaa rakenteen toimintaa
 11. Edistää alan kehittymistä
 12. Dokumentoida rakenteen käyttäytyminen vaurioiden arvioinnin avuksi
 13. Informoida asianosaisia
 14. Täyttää viranomaisten vaatimukset
 15. Vähentää oikeudenkäyntejä
 16. Osoittaa, että kaikki on kunnossa
-

Monitoroinnilla voidaan saada ennakkovaroitus ennen kuin haitallisia muutoksia pääsee tapahtumaan, jolloin korjaavien toimenpiteiden suorittaminen on mahdollista, joka merkittävästi vähentää vaurioriskiä. Samalla turvallisuus paranee, kun siirtymien suuruutta pystytään seuraamaan suhteessa ennalta asetettuihin sallittuihin siirtymiin. (Dunncliff 1988, Marr 2007.) Vauriot voivat pysäyttää työmaan tai aiheuttaa viivästyksiä, jotka kasvattavat kustannuksia. (Marr 2007.)

Monitorointia voidaan käyttää osoittamaan suunnitelmien oikeellisuus tai virheellisyys sekä korjata mahdolliset suunnitteluvirheet ennen kuin vaarantavia muutoksia kehittyy (Dunncliff 1988, Marr 2007). Monitoroinnin etuna on myös se, että saatavien tulosten avulla voidaan osoittaa, että rakenteen ja maan käyttäytyminen on suunnitelmien ja sallittujen arvojen mukaista. Tämä antaa luottamusta työn onnistumiseen ja mahdollistaa paremman keskittymisen työmaata edistäviin tehtäviin. Tarvittaessa suunnitelmia voidaan päivittää vastaamaan mittausten osoittamia olosuhteita, kun maan käyttäytyminen tunnetaan. (USACE 1995, Marr 2007.)

Vaurioiden korjaaminen helpottuu, että vaurioitumiseen johtaneet syyt ovat tiedossa. Monitorointi voi auttaa syiden määrittämisessä ja mahdollistaa jopa halvemman korjauksen, jos vaurion tarkka syy saadaan mittauksilla selville. Varhaisessa vaiheessa havaittujen haitallisten muutosten korjaaminen on yleensä sitä halvempaa mitä aikaisem-

min muutos havaitaan ja korjataan. (Marr 2007.) Mittaustuloksista voi olla apua myös myöhemmin ilmenevien ongelmien ratkaisemisessa (USACE 1995).

Uusien rakenteiden ja rakentamistapojen toimintaa pystytään mittaamaan, jolloin toiminnan osoittaminen ja hyväksynnän saaminen helpottuu. Mittaustulosten avulla voidaan arvioida myös rakenteen toimintaa huonoimmissa oletettavissa olosuhteissa. (USACE 1995.) Elementtimenetelmillä tehtyjen mallinnuksien todenmukaisuutta voidaan seurata rakentamisvaiheessa tarkkailumittauksin (Dunnicliff 1988).

Monitoroinnista saatavien tulosten avulla voidaan kehittää maamekaniikkaa koskevia teorioita, joka kehittää koko alaa. Mittauksia onkin käytetty paljon tutkimuskäytössä, jolloin on voitu parantaa tietämystä. (Marr 2007.) Mittaustuloksista saatuja tietoja voidaan hyödyntää seuraavien kohteiden yhteydessä, joka voi säästää kustannuksia, parantaa työmenetelmiä, ymmärrystä maaperästä ja rakenteen toiminnasta sekä vähentää riskejä samalla parantaen turvallisuutta. (USACE 1995, Marr 2007.)

2.2.3 Oikeudellinen turva

Rakennustyö voi aiheuttaa vahinkoa ympäröiviin rakenteisiin, kuten rakennuksiin ja putkilinjoihin (Dunnicliff 1988). Läheisten rakenteiden vaurioituminen voidaan mahdollisesti estää, jolloin vältetään korjauskustannusten lisäksi oikeudenkäynnit ja niistä aiheutuvat kustannukset. Viereisiin rakenteisiin aiheutuneet vauriot ja oikeuskäsittelyt heikentävät myös yrityksen imagoa. (Marr 2007.) Vauriot voivat myös ilmetä vasta rakentamisen jälkeen (USACE 1995). Instrumentoinnista saadusta aineistosta on hyötyä, jos joudutaan osoittamaan, onko vahinko aiheutunut rakennustyöstä (Dunnicliff 1988, Marr 2007). Osapuolina voivat olla tällöin tilaaja, urakoitsijat tai kolmannet osapuolet. Jos mittaustulosten perusteella on mahdollista selvittää, mistä ongelma aiheutui ja kenen vastuulla sen korjaaminen on, voidaan oikeuskäsittely välttää tai ainakin lyhentää oikeudenkäyntiä. Myös kohtuullisten korvausten määrittäminen voi helpottaa. (Marr 2007.)

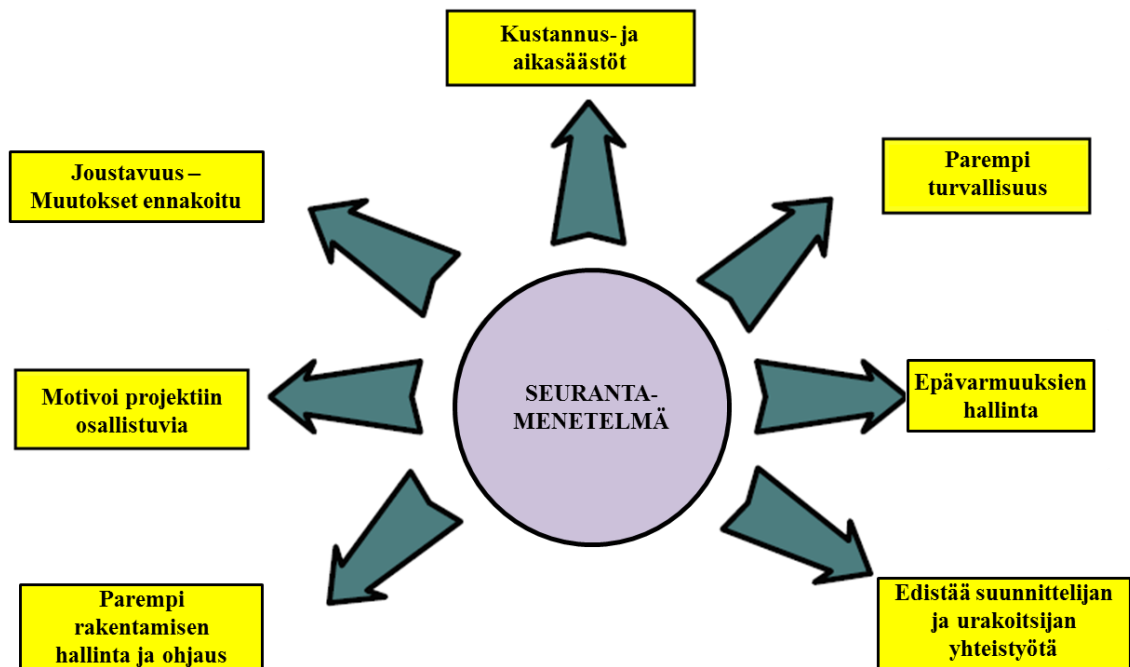
2.2.4 Rakentamisen ohjaus

Monitorointia voidaan käyttää rakentamisen ohjaukseen, joka tarkoittaa sitä, että mittauksilla seurataan ympäristön siirtymiä ja muutoksia, joiden pohjalta aikataulua tai suunnitelmia voidaan mukauttaa (Dunnicliff 1988). Esimerkiksi pengertä rakennettaessa mittausten avulla voidaan määrittää kuormituslisäykselle sopiva suuruus ja ajankohta. Mittauksilla voidaan saavuttaa myös nopeusetua, sillä penkereen rakentamiseen kuluva aika voidaan minimoida ilman, että stabiliteetti vaarantuu. Monitoroinnin avulla on mahdollista säästää kustannuksissa, koska rakennustyö voidaan tehdä nopeammin ja kustannustaloudellisemmin. (Marr 2007.)

Urakoitsijan käyttämistä virheellisistä työtavoista aiheutuvia ongelmia voidaan havaita monitoroinnilla riittävän ajoissa, jotta vaurioita ei pääse mahdollisesti edes syntymään. Työtapaa voidaan muuttaa tai vaihtaa, mikäli havaitaan, että työn jatkamisesta voi aiheutua vahinkoa. Mittaustuloksista voi olla mahdollista saada selville, miksi kyseinen työtapo ei sovellu käytettäväksi. (Marr 2007.)

2.3 Seurantamenetelmä

Seurantamenetelmä (Observational method) on EN 1997-1 hyväksymä suunnittelumenetelmä haastaviin kohteisiin. Seurantamenetelmä tarkoittaa geoteknisessä suunnittelussa jatkuvaa ja hallittua suunnittelua, työn valvontaa, monitorointia ja arviointia, mikä mahdollistaa ennalta määriteltujen muutosten tekemisen rakentamisen aikana tai sen jälkeen. Tavoitteena on suurempi kustannustehokkuus turvallisuutta vaarantamatta (Kuva 1). Seurantamenetelmässä monitorointi on suunnittelussa aktiivisena osapuolena, kun tavallisesti monitorointia on käytetty vain suunnitelmien oikeellisuuden valvontaan. (Patel 2005.) Tavallisesta suunnittelusta poiketen seurantamenetelmässä tulee etukäteen miettiä mahdolliset ongelmakohdat ja niiden ratkaisut. Monitorointia käytetään seurantamenetelmässä jatkotoimenpiteiden määrittämiseen maan ja rakenteen käyttäytymisen perusteella. Sallittujen raja-arvojen ylittyessä vaihtoehtoiset suunnitelmat otetaan käyttöön. Tämä johtaa suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen vahvempaan yhdisteenliittymään. (Patel 2005, Arsenio et al. 2009.)



Kuva 1. Seurantamenetelmän mahdollisia hyötyjä (Patel 2005).

Seurantamenetelmän käytöstä saavutetaan suurin hyöty toteutukseltaan epävarmoissa kohteissa (Patel 2005). Geotekninen monitorointi mahdollistaa yksittäisten rakenteen osien ja osa-alueiden toiminnan mittaamisen, joka auttaa mahdollisten ongelmien rat-

kaisemisessa. Tämä on erityisen tärkeää, kun kyseessä on tavallista haastavampi tai uuden tyyppinen kohde. (Arsenio et al. 2009.) Aina tulee kuitenkin varmistua, ettei kohteessa pääse tapahtumaan äkillistä heikentymistä, joka ei mahdollistaisi korjaavia toimenpiteitä ja aiheuttaisi laajaa vahinkoa (Patel 2005).

EN 1997-1 ei sisällä tarkkaa ohjeistusta koskien seurantamenetelmässä käytettäviä mittaustauksia ja rakenteen liikkeiden suuruuksille asetettavia rajoja. Standardissa ei ole erityisesti sanottu, miten kyseiset raja-arvot tulee määrittää, jolloin suunnittelija voi määrätä raja-arvot, mikäli rakenteen käyttäytyminen oletettavasti on näiden rajojen sisällä. Ominaisarvoilla voidaan laskea sallitut arvot, mutta ne eivät edusta seurantamenetelmässä tavallisesti käytettyjä arvoja, vaan ovat hieman turvallisella puolella. EN 1997-1 ei myöskään määrittele, miten hälytysrajat varasuunnitelma käyttöön ottamista varten tulee asettaa. (Patel 2005.) EN 1997-1 velvoittaa määrittämään seuraavat asiat ennen rakentamista: (SFS-EN 1997-1 2004)

- rakenteen liikkeiden hyväksytyt rajat
- rakenteen mahdollinen käyttäytyminen ja näitä vastaan riittävä varmuus
- monitorointisuunnitelma, joka mahdollistaa rakenteen käyttäytymisen seurannan ja riittävän lyhyen vasteajan korjaavien mahdollisten toimenpiteiden suorittamista varten
- varasuunnitelma, mikäli rakenteen liikkeille sallitut rajat ylitetään.

2.4 Haasteita

Monitoroinnin edistämisessä suurin ongelma on ollut mittausten hyötyjen esittäminen siten, että ne ovat selkeästi ymmärrettävissä. Monitorointiohjelmia supistetaan monesti projektista vastaavien henkilöiden toimesta, koska mittausten syitä ja hyötyjä ei ymmärretä. Urakoitsija voi pitää mittauslaitteita haittana ja esteenä työmaalla ja mittauksien tulokset aiheuttavat vain ongelmia. Mittausten tarkoitus ja tärkeys tulisi määrittää ja perustella selvästi sekä kokonaisuutena että jokaisen laitteen osalta. (Marr 2007.)

Väärän tyyppiset mittauslaitteet, jotka on sijoitettu mittauksen kannalta väärin sijainteihin, voivat heikentää tiedon hyödynnettävyyttä tai jopa tuottaa ristiriitaista tietoa, joka voi häiritä oikeiden johtopäätösten tekemistä (USACE 1995). Mittauslaitteiden tulee toimia luotettavasti, jotta toimenpiderajojen ylittyessä voidaan olla varmoja, että mittauksien tulos on oikea ja toimenpiteisiin täytyy ryhtyä. Ylimääräistä aikaa ei saa kulua mittauslaitteiden toiminnan ja tulosten virheettömyyden varmistamiseen. (Marr 2007.)

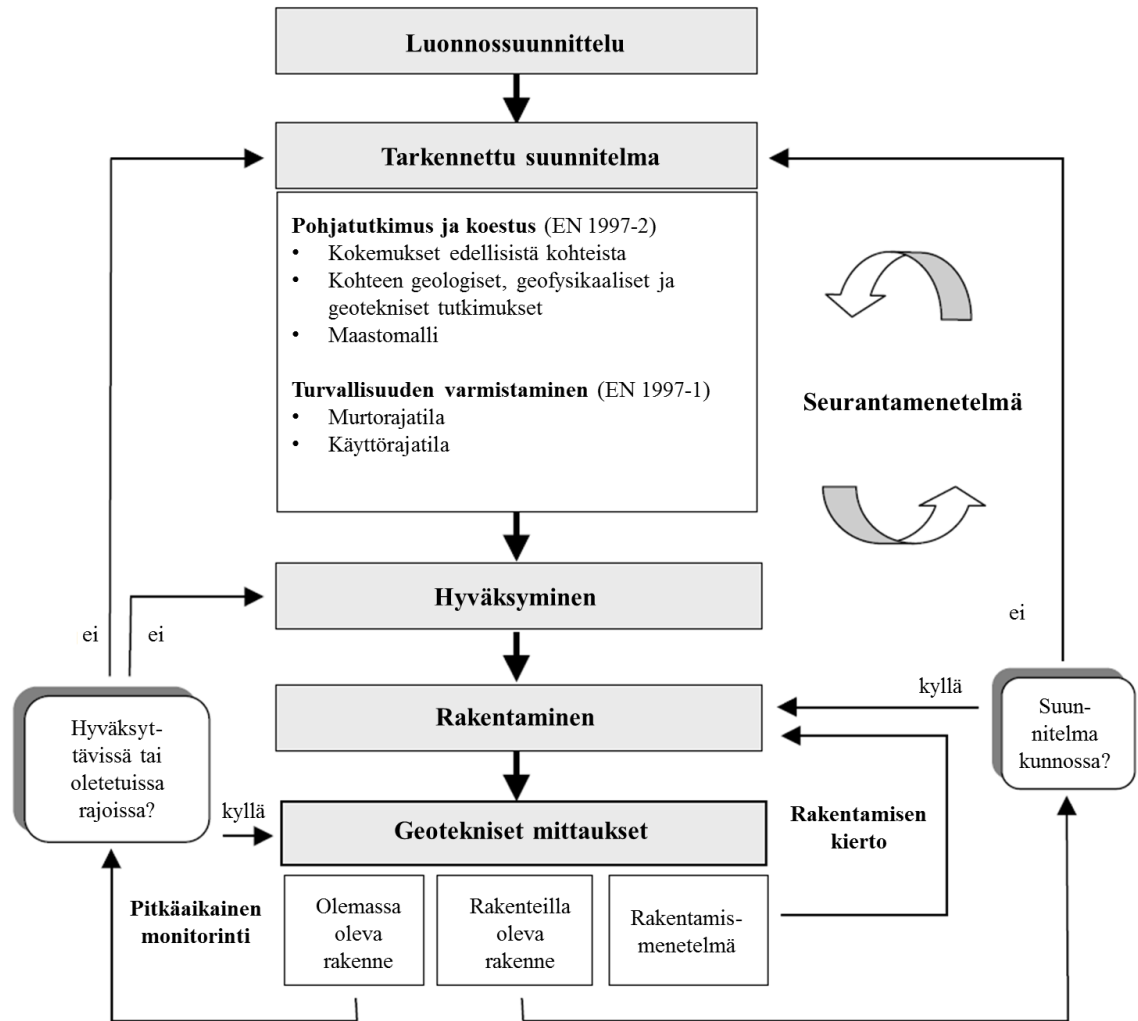
3 Monitorointiprojekti

3.1 *Liittyminen geotekniseen suunnitteluun ja rakentamiseen*

EN 1997-1:ssä on selostettu geoteknisen seurannan liittymistä geotekniseen suunnitteluun ja rakentamiseen (Kuva 2). Rakenteen toimintaa tulee seurata, mikäli se on rakenteen turvallisuuden ja laadun varmistamisen kannalta tarpeellista. Monitorointi on edellytys seurantamenetelmän käytölle. Suunniteltavasta kohteesta laaditaan valvonta- ja monitorointisuunnitelma, joka liitetään osaksi geoteknistä suunnitteluraporttia. Suunnitteluraportti sisältää valvontaan ja monitorointiin liittyvien mittausten tarkoituksen, mittauskohteiden ja -pisteiden sijainnit, mittaustiheyden, mittausten keston, mittausten arviointitavat ja tulosten oletetut vaihteluvälit sekä kaikki mittauksiin liittyvät osapuolet ja heidän vastuunsa. Monitorointiohjelma laaditaan geoteknisen suunnitteluraportin mukaisesti. (SFS-EN 1997-1 2004.)

Monitorointia varten tehtävät parametrien mittaukset voidaan jakaa seuraavasti: (SFS-EN 1997-1 2004)

- maan muodonmuutokset, jotka aiheutuvat rakenteesta
- kuormitusten arvot
- maanpaine rakenteen ja maan välillä
- huokosvedenpaine
- voimat ja muodonmuutokset rakenteellisissa osissa.

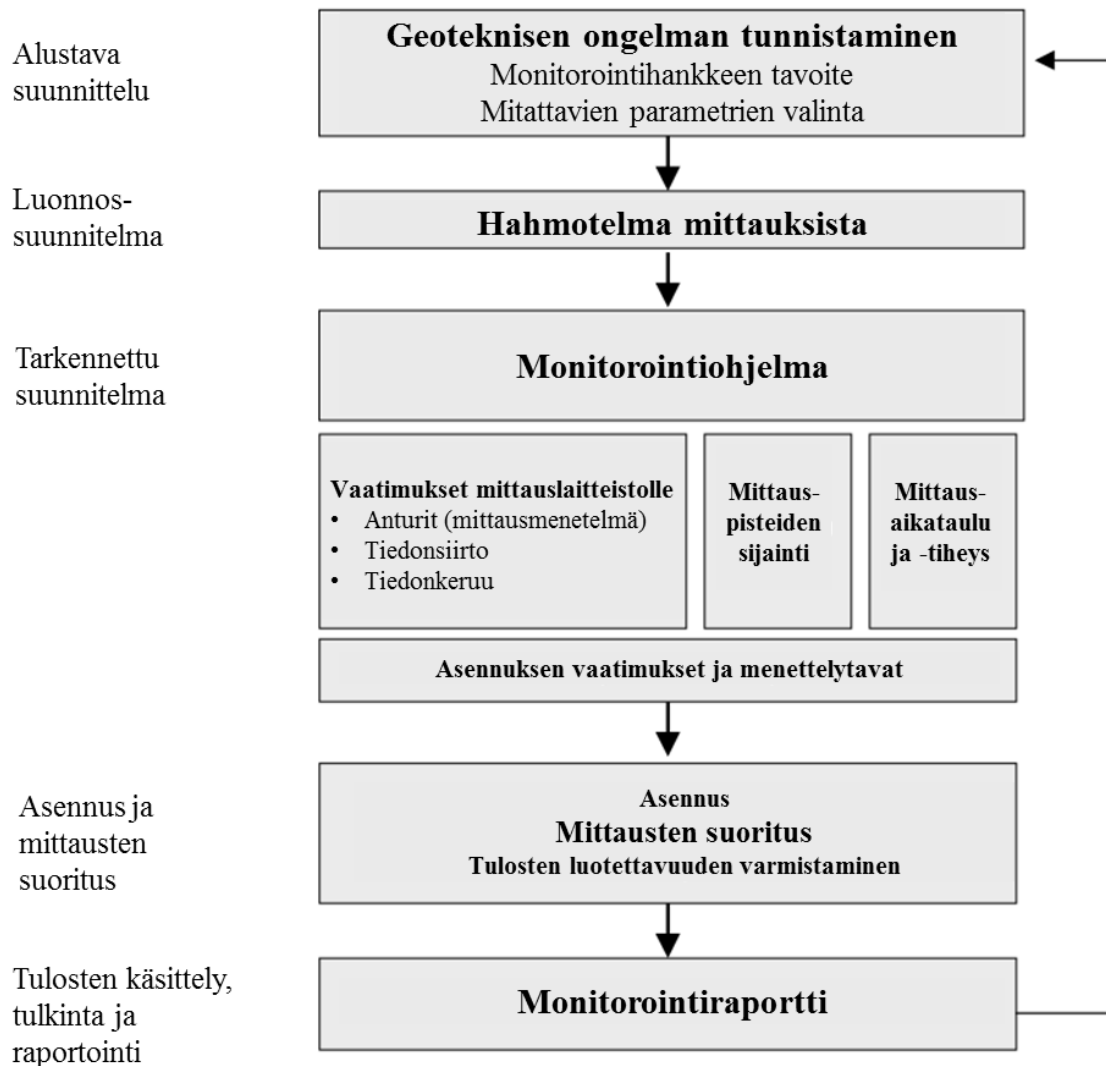


Kuva 2. Seurannan liittyminen geotekniseen suunnitteluun ja rakentamiseen (CEN-WI 00341066 2012).

3.2 Monitoroinnin suunnittelu

3.2.1 Alustava suunnittelu

Monitorointiohjelman laatiminen alkaa tavoitteiden määrittämisellä sekä kohteeseen ja sen olosuhteisiin tutustumisesta (Kuva 3). Suunnittelijan tulisi tuntea ainakin perustiedot rakenteesta, maaperästä ja lähellä sijaitsevista rakenteista. Kohteessa mahdollisesti tapahtuvat liikkeet ja muut haitalliset tapahtumat tulee arvioida, koska käytettävät mittausmenetelmät valitaan mittamaan näitä liikkeitä. Jokaisen mittauspisteen ja -menetelmän tulee olla projektin kannalta tarpeellinen. Mittaus on turha, jos se ei tuota seurannan kannalta tarpeellista tietoa. (Dunnicliff 1988.) Poikkeuksena ovat mittauslaitteen toiminnan varmistamiseksi mitattavat liikkumattomat pisteet. Mikäli instrumentoinnin tarkoitusta ei voida määritellä tai mittaustulokset uhkaavat jäädä tarpeettomiksi, tulisi monitorointiohjelman laatiminen lopettaa (Dunnicliff 1988).



Kuva 3. Monitorointiprojektin vaiheet (CEN-WI 00341066 2012).

Alustavan suunnittelun yhteydessä kohteen kannalta kriittiset parametrit ja niiden muutosten sallitut suuruudet tulee määrittää (CEN-WI 00341066 2012). Parametreja mitattaessa tulee huomioida, että mitataanko muutoksen syytä vai seurausta tai molempia. Esimerkiksi luiskun stabiliteettia seurattaessa mitataan yleensä muodonmuutosta, joka aiheutuu usein huokosvedenpaineesta. (Dunnicliff 1988.)

3.2.2 Luonnossuunnittelu

Luonnossuunnitteluvaiheessa valitaan mittausjärjestely, jolla pystytään mittaamaan halutut parametrit. Määritettäviä asioita ovat mittauslaitteet, mittaustiheys, mittausten liittämättömyys ja mittausjärjestelyn arvioitu käyttöaika. (CEN-WI 00341066 2012.) Mittauslaitteistojen tärkein ominaisuus on luotettavuus sekä kestävyys suunnitellussa käyttöympäristössä. Mittauslaitteen hinnan ei tulisi olla ensisijainen valintaperuste, vaan kustannuksia tulisi arvioida mittausjärjestelyn kokonaistaloudellisuuden kannalta. (Dunnicliff 1988.) Mittausjärjestelmän tulee soveltua kohteessa vallitseviin olosuhteisiin, mikä tulee huomioida laitteistoa valittaessa ja tuloksien tulkinnan yhteydessä.

Huomioitavia asioita ovat myös mittauslaitteen ja mitattavan kohteen kiinnitykseen vaikuttavat mekaaniset ja lämpötilaeroista johtuvat muutokset sekä ympäristöolosuhteiden vaikutus järjestelmän osiin. Laitteiston tulee kestää siihen vaikuttavat ympäristö- ja työmaaolosuhteet sekä mahdollinen ilkivalta. Myös tiedonsiirtoyhteyksien kestävyys tulee huomioida ja pyrkiä mahdollisimman ongelmattomaan ratkaisuun. (CEN-WI 00341066 2012.)

Mittausmenetelmän valinnassa tulee huomioida myös asentajan ja insinöörin tuntemus kyseisestä laitteistosta. Heidän tulee myös tietää, tarvitseeko laitteistoa kalibroida tai mittaustuloksia korjata. Käytettävien menetelmien pitäisi olla entuudestaan toimiviksi havaittuja. Uutta menetelmää sovellettaessa tulee menetelmän toiminta varmistaa toisella luotettavaksi havaitulla mittausmenetelmällä, jolla voidaan mitata samaa muutosta. Laitteiden valinnassa on hyvä kiinnittää huomiota siihen, haittaavatko ne työmaan toimintaa. Mittauslaitteiden ja varaosien saatavuus tulee myös varmistaa, koska se voi vaikuttaa laitteiden valintaan. (Dunnicliff 1988.)

Mittauslaitteet sijoitetaan ensisijaisesti kohtiin, jotka on todettu kriittisimmiksi. Näistä kohdista saatuja tuloksia verrataan suoraan suunnittelussa käytettyihin tai laskettuihin arvoihin, joka helpottaa myös takaisinlaskentaa. Mittauksia tulee tehdä lisäksi muista sijainneista, jotta voidaan varmistua, että kriittisimmät kohdat on valittu oikein. Tämä mahdollistaa myös kokonaiskuvan muodostamisen tutkitun kohteen käyttäytymisestä. Mittauksien paikallisuus tulee ottaa huomioon ja miettiä miten yksittäinen mittaus edustaa laajempaa kokonaisuutta. Mittauksen luotettavuus yleensä edellyttää useampia mittauspisteitä, jolloin paikalliset vaihtelut voidaan havaita tuloksista. (Dunnicliff 1988.)

Mittausjärjestelyn tulee sisältää hieman päällekkäisiä mittauksia, jotta yhden mittauslaitteen toimintahäiriö ei aiheuta merkittävää haittaa. Mittausten rinnakkaisuus mahdollistaa myös virheellisten tulosten havaitsemisen ja korjaamisen vertaamalla viereisien mittauslaitteiden tuloksia keskenään. Mittausantureita tai -laitteita voidaan asentaa vähimmäismäärää enemmän tai mitata yhtä mittauskohdetta useammalla mittauslaitteella. Mittausperiaate voi tällöin olla molemmissa mittauksissa sama, mutta parhaaseen varmuuteen päästään, mikäli yhtä mittauspistettä mitataan eri mittausperiaatteeseen perustuvilla laitteilla. (CEN-WI 00341066 2012.)

Mitattavien muutosten suuruus tulee ennakoida, jotta mittausmenetelmien mittausalue ja herkkyys voidaan valita kohteeseen sopiviksi (Dunnicliff 1988). Vaaditut mittaustarkkuudet voivat olla parempia, kuin käytössä olevien menetelmien mittaustarkkuus, joka tulisi ottaa huomioon jo mittausjärjestelyä suunniteltaessa (Halkola 2013). Menetelmä voidaan valita joko suurimman mahdollisen muutoksen tai suurimman mielenkiintoisen muutoksen mukaan. Herkkyys tulee valita pienimmän mielenkiintoisen muutoksen pe-

rusteella. Jos kohteessa liikkeiden suuruudelle tarvitsee asettaa hälytysrajoja, tulisi se tehdä tässä vaiheessa. (Dunnicliff 1988.) Mittauslaitteita voidaan myös automatisoida ja asettaa niihin hälytysrajat, joiden ylittyessä laitteisto varoittaa automaattisesti (Marr 2007). Hälytysrajoja koskevat toimintaohjeet laaditaan etukäteen kunkin rajan ylittävää tapahtumaa varten. Hälytysrajat tulisi ilmoittaa numeerisina arvoina. Hälytysrajojen ylityksistä seuraavat toimenpiteet tulee suunnitella siten, että ne pystytään suorittamaan kohteessa olevan henkilöstön ja tarvikkeiden avulla riittävän lyhyessä ajassa. Mittaustuloksia tulkitsevilla henkilöllä tulee olla valtuudet korjaavien toimenpiteiden aloittamiseen. (Dunnicliff 1988.) Automaattisella mittauslaitteistolla voidaan valvoa riskeiltään merkittävimpiä rakenneosia (Marr 2007).

3.2.3 Tarkennettu suunnitelma

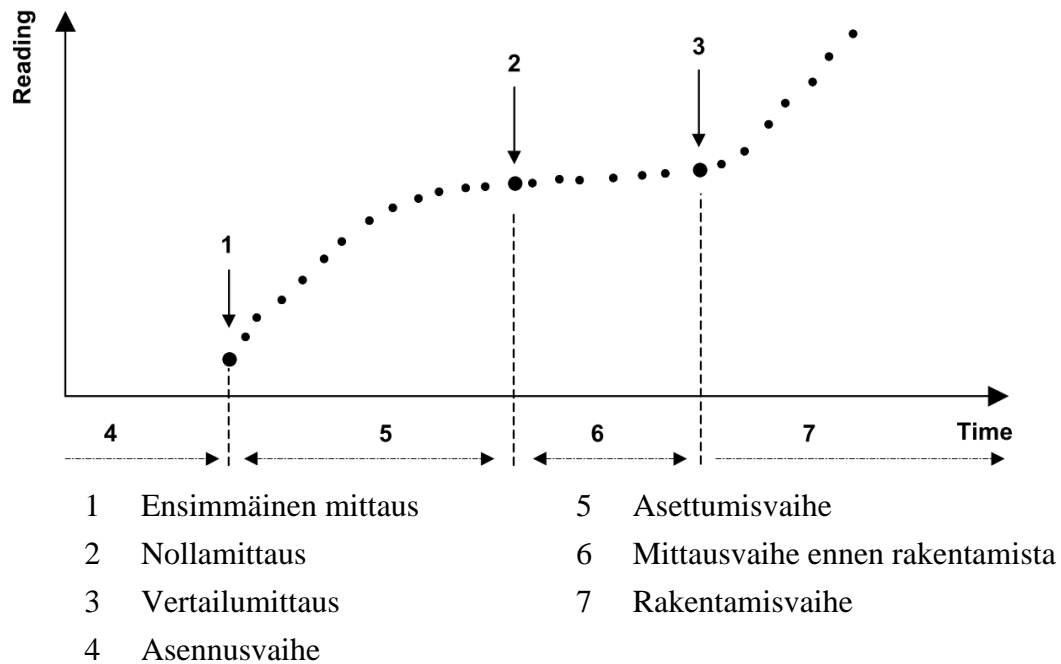
Tarkennetun suunnittelun vaiheessa laaditaan monitorointiohjelma, joka sisältää kaikki projektiin liittyvät, ennen mittauksia suunniteltavissa olevat osa-alueet. Monitorointiohjelma sisältää tiedot mittausjärjestelystä sisältäen mittauslaitteet ja toimintaperiaatteet, mittauspisteiden sijainneista, mittausten tiheydestä ja aikataulutuksesta, tiedonkeruun menetelmästä ja laitteiden asennuksesta. (CEN-WI 00341066 2012.) Mittausmenetelmiä, -laajuutta tai -tiheyttä voidaan tarvittaessa muuttaa seurannan aikana, jos siihen on työn aikana saatavan tiedon perusteella syytä (SFS-EN 1997-1 2004).

Laitteiston asentamista varten tulee kirjoittaa tarkat työohjeet. Ohjeiden tulee sisältää asennuksessa tarvittavat materiaalit ja työkalut sekä asennuspöytäkirjalomakkeet. Lisäksi kohteessa kyseeseen tulevat kytkennät ja järjestelmät kirjataan ohjeeseen. Tarvittaessa myös asentajien koulutus tulee suunnitella. (Dunnicliff 1988, Arsenio et al. 2009.)

Ylläpidosta ja kalibroinnista laaditaan oma suunnitelmansa, joka käsittää eri laitteiden ylläpidon ja korjauksen suunnittelun sekä huoltoa varten sähkönsaannin, viestintäyhteydet ja varastotilat. Tiedonkäsittelyä ja tulkintaa käsittelevä ohjeistus tulee tehdä ennen mittausten aloittamista. Monitoroinnin eri osapuolien vastuista tehdään kirjallinen sopimus, joka liitetään monitorointiohjelmaan. (Dunnicliff 1988.)

3.3 Asennus ja mittausten suoritus

Seurannan laajuuden tulee olla vähintään suunnitelmien mukainen (SFS-EN 1997-1 2004). Asennusvaiheessa mittauslaitteet tulee asentaa riittävän aikaisin ennen rakentamisen aloittamista, jotta mittaustuloksia saadaan kerättyä jo ennen rakentamista (Kuva 4). Asentaminen tulee suorittaa siten, että saadaan laadukkaita mittaustuloksia, eikä mittauslaitteella ole vaikutusta mitattujen arvojen suuruuteen. Mittauslaitteita tulee käsitellä valmistajan antamien ohjeiden mukaisesti. (CEN-WI 00341066 2012.)



Kuva 4. Ennen rakentamista tehtävien mittauksen vaiheistus (CEN-WI 00341066 2012).

Mittauslaitteet ovat lähtökohtaisesti asennusvalmiita, kun ne saapuvat toimittajalta. (Dunncliff 1988.) Valmistajan tulee toimittaa dokumentti laitteen kalibroinnista. Laitteiston toiminta tulee tarkistaa jo ennen asentamista, jolloin voidaan varmistua, että laitteisto ei ole vahingoittunut kuljetuksen aikana. Laitteiden oikea toiminta pitäisi tarkistaa myös asentamisen jälkeen ennen varsinaisen seurannan aloittamista. Mittauslaitteiden ylläpito ja kalibrointi tulee suorittaa säännöllisesti ja ohjeiden mukaisesti. Kalibrointiväli tulee kirjata monitorointiohjelmaan. Ylimääräisiä kalibrointeja tulee suorittaa, mikäli se on perusteltua. Mitattavaan kohteeseen kiinteästi asennettavia mittausantureita ei ole mahdollista kalibroida, jolloin laitteen toiminta tulee varmistaa tuloksia analysoimalla ja rinnakkaisilla mittauspisteillä. Mitattujen tulosten tulisi olla yhdenmukaisia ja muutosten tasaisia. Pitkäaikaisessa seurannassa kiinteästi asennettavien antureiden vakaus on erityisesti huomioitava. (CEN-WI 00341066 2012.)

Mittauslaitteiden asentajalla tulee olla riittävä näkemys geotekniikasta ja mittaukseen ja laitteistoon liittyvistä vaikeuksista, jotta asennuksen vaatimukset voidaan ottaa huomioon. Asennuksen onnistuminen riippuu paljolti asennusryhmän ammattitaidosta ja oikeasta asennustavasta. Asennusvaiheessa ohjeiden ja suunnitelmien noudattaminen on ensiarvoisen tärkeää, jotta voidaan varmistaa mittauslaitteen suunniteltu toiminta. (Dunncliff 1988.)

Mittauksia suorittavan henkilön tai tahon tulisi olla sama koko projektin ajan. Mittaushenkilöstön tulisi tietää monitoroinnin tarkoitus kohteessa ja rakennustöistä oletettavasti aiheutuvat muutokset. (CEN-WI 00341066 2012.)

Mittaustulosten yhteydessä tulee kirjata myös mittausajankohta ja mittauskohdan lämpötila sekä muut laitteen tulosten tulkinnan kannalta tarpeelliset tai hyödylliset tiedot. Mittausten yhteydessä havaittavat huomionarvoiset asiat tulee myös kirjata, kuten (CEN-WI 00341066 2012)

- muutokset pohjavesiolosuhteissa
- tukirakenteiden jännitysten muutos tai muodonmuutos
- maan liikkeet
- halkeamien muodostuminen.

Mittaustulokset eivät usein yksinään riitä tarpeellisten johtopäätösten tekemiseen. Mittauksilla havaitut muutokset yritetään yleensä yhdistää niitä aiheuttaviin syihin. Tuloksiin mahdollisesti vaikuttavat tekijät tulee kirjata, jotta tekijöiden vaikutus tuloksiin voidaan huomioida. Kirjattavia asioita ovat ainakin muutokset maaperässä, silmämääräiset havainnot, rakennusvaihe ja -menetelmä sekä sääolosuhteet. (Dunnicliff 1988.)

3.4 Mittaustulosten käsittely

3.4.1 Käsittely ja tulkinta

Mittaustulokset tulee aina tulkita ja arvioida (SFS-EN 1997-1 2004). Tulosten käsittelyn ja esittämisen lähtökohta on aineiston havainnollistaminen, joka mahdollistaa muutosten nopean arvioinnin. Tuloksista on tällöin myös helpompaa nähdä muutokset, jotka vaativat välittömiä toimenpiteitä. Toinen tavoite on mittaustulosten kehityssuunnan esittäminen ja ennakoitujen arvojen vertaaminen saatuihin arvoihin. (Dunnicliff 1988.) EN 1997-1 mukaisen geoteknisen luokan 1 kohteissa toimivuuden arviointi voi olla laadullinen ja silmämääräinen. Luokan 2 kohteissa siirtymien mittaus määritetyistä kohdista on tavallisesti riittävä rakenteen toiminnan arviointiin. Geoteknisen luokan 3 kohteissa suoritetaan myös tavallisesti siirtymämittauksia, mutta tulosten arvioinnissa tulee huomioida myös rakentamisjärjestys. (SFS-EN 1997-1 2004.)

Tulosten oikeellisuus tulee alustavasti varmistaa mittauksen aikana tai heti sen jälkeen, jotta virheelliset mittaukset voidaan uusida heti (CEN-WI 00341066 2012). Mittauslaitteiston kunto tarkastetaan silmämääräisesti ja tuloksia verrataan viereisten mittauslaitteiden tuloksiin sekä toistettuihin mittauksiin. Automatisoidussa mittauksessa silmämääräistä tarkastusta ei tavallisesti tehdä. (Dunnicliff 1988.) Mittaustulosten alustavassa käsittelyssä tarkastetaan nopeasti, toimenpiteitä vaativia onko muutoksia tapahtunut. Jos mittaustulokset ovat oletuksista poikkeavia, tulee tulokset käsitellä ja arvioida heti ja selvittää, johtuvatko poikkeukselliset tulokset mittaukseen liittyvästä virheestä vai ovatko oletetut muutosten suuruudet vääriä. (CEN-WI 00341066 2012.) Mikäli mittaukset

ovat mittauskonsultin suorittamia, tulisi konsultin valvoa mittaustuloksia, jotta mahdollisia virheellisiä tuloksia ei lähetetä eteenpäin (Halkola 2013).

Tulosten käsittelyn yhteydessä mittaustulokset tulee muuttaa muutosta kuvaaviin teknisiksi yksiköihin (CEN-WI 00341066 2012). Tarkemmassa tarkastuksessa tuloksista etsitään selviä virheitä ja arvioidaan mittauksen yhteydessä tehdyt huomiot (Dunnicliff 1988). Mittaustuloksia käsitellessä tulee huomioda, että mittauslaitteisto, asennus ja ympäristötekijät vaikuttavat usein tuloksiin. Tulosten todenmukaisuus tulee varmistaa tulosten käsittelyn yhteydessä. Tuloksia tulee arvioida kohteen mittauslaitteiston ja -ympäristön vaikutus huomioon ottaen. (CEN-WI 00341066 2012.) Tuloksissa esiintyvää mittausmenetelmästä johtuvaa hajontaa ei tule tulkita todellisiksi muutoksiksi, vaan tulkitsijan tulee ymmärtää käytetyn mittausmenetelmän rajoitukset (Halkola 2013). Mittauslaite voi itsessään aiheuttaa muutoksia mitattaviin parametreihin (USACE 1995). Tulkitsijan tulee myös tietää, voiko tulosten hajontaa pienentää kalibroinnilla tai korjaamalla tuloksia (Dunnicliff 1988). Systemaattiset virheet voi olla mahdollista poistaa tuloksista, mutta tieto korjauksesta tulee kirjata (CEN-WI 00341066 2012). Mittaustulosten tulkinnalla ja tuloksiin reagoinnilla täytyy olla ennalta määrätty käytäntö, joka täytyy määrittää ennen seurannan aloittamista. (Dunnicliff 1988.)

Tulosten oikeellisuus tulee varmistaa esimerkiksi jollakin seuraavista tavoista: (Dunnicliff 1988.)

- Tuloksia verrataan toiseen samanlaiseen tai muuhun vastaavaa parametria mittaamaan mittauslaitteeseen.
- Eri parametrien muutoksia verrataan keskenään.
- Mitatut muutokset todetaan silmämääräisellä tarkastelulla.
- Mittauslaitteeseen aiheutetaan muutos, joka mitataan ja tällä tavalla varmistetaan tulosten oikeellisuudesta.

Tulkinnassa verrataan mitattuja tuloksia ennakoituihin arvoihin ja muihin tuloksiin vaikuttaviin tekijöihin. Tulkintaa ohjaa seurannan tarkoitus; tulkitaan asioita, jotka ovat kohteen kannalta merkityksellisiä. Tulkintaa tekevän henkilön tulisi olla kokenut ja tuntee käytössä oleva mittausjärjestely ja -laitteisto. Tulkinta on jatkuva prosessi, joka etenee uusien tulosten mukana. (Dunnicliff 1988.)

Tuloksien käsittelystä ja esittämisestä vastaava taho tulisi päättää jo suunnitteluvaiheessa. Tulosten käsittelyyn tulee varata riittävästi resursseja, jotta mittaustulosten käsittely ei viivästy ja aiheuta puutteellisista tiedoista johtuvia virhearvioita. (Dunnicliff 1988.) Mittausten onnistuminen ja tavoitteiden täytyminen geoteknisen projektin kannalta sekä mittaustulosten luotettavuus tulee arvioida. (CEN-WI 00341066 2012)

3.4.2 Esitystavat

Mittaustulokset tulisi esittää taulukoissa ja kuvaajina, joihin on liitetty tiedot mittauksittain ja mittauspisteittäin (CEN-WI 00341066 2012). Tuloksista voidaan piirtää tarpeen mukaan erilaisia kuvaajia, joiden ominaisuudet valitaan esitettävään tietoon soveltuviksi. Kuvaajien ensisijaisena tarkoituksena on parantaa tiedon luettavuutta. Tavallisin kuvaaja on ajasta riippuva kuvaaja, josta nähdään muutosten suuruus ja nopeus. Aikakuvaajan perusteella voidaan myös ennakoida tulevia muutoksia. Toisinaan voi olla tarpeellista piirtää kuvaaja, jossa verrataan muutosnopeutta aikaan tai muutoksen kiihtyvyyttä aikaan. Nämä kuvaajat soveltuvat paremmin muutosnopeuden tarkkailuun. Oletettua käyttäytymistä voidaan verrata mitattuun käyttäytymiseen vertaamalla näitä kahta piirrettyä samaan kuvaajaan. Samaan kuvaajaan voidaan myös piirtää kahden eri mittauslaitteen tulokset, olettaen että molempien tulokset muutetaan samaan yksikköön tai keskinäiseksi suhteeksi. Kuvaajilla voidaan myös esittää syy-seuraussuhteen välinen yhteys, joka on yleensä monitorointikohteissa mielenkiintoinen yhteys. Tavallinen syy-seuraussuhde on penkereen korkeuden ja painuman yhteys. (Dunnicliff 1988.)

Kuvaajaan sisällytettävän tiedon määrä tulisi miettiä tapauskohtaisesti kuvaajan käyttö-tarkoituksen mukaan. Kuvaajaan sisällytettävän tiedon tulee olla selkeästi luettavissa, eikä kaikkea kohteesta saatavissa olevaa dataa yleensä kannata sisällyttää yhteen kuvaajaan. Valitun tiedon pitäisi havainnollistaa merkittävimmät muutokset ja muutosten suunnan sekä mahdolliset vaihtelut. (Dunnicliff 1988.) Suunnittelijan tulisi määrittää mittaussuunta ja kuvaajat tulisi tulostaa mielenkiintoisen muutoksen suuntaisesti. Mikäli monitoroinnin kannalta mielenkiintoinen suunta tiedetään jo suunnitteluvaiheessa, tulisi tieto tästä saada myös asentajalle, jos tieto vaikuttaa mittauslaitteiston asennukseen. Kuvaajan mittakaava voi vaikuttaa tuloksista saatavaan vaikutelmaan ja mittakaava tulisi valita kohteen mielenkiintoisten muutosten mukaan. Automaattinen mittakaava sovitaa mitatut muutokset kuvaajaan, joka voi aiheuttaa virheellisen tulkinnan muutosten vakavuudesta. Pienikin mitattu tai mittaustarkkuudesta johtuva muutos voidaan mieltää merkittäväksi, jos se on sovitettu kuvaajan kokoon. (Halkola 2013.) Myös mittausvirheestä johtuva yksittäinen suuri arvo voi haitata todellisten muutosten havaitsemista kuvaajassa. Tapauskohtaisesti kuvaajiin voi olla tarpeellista merkitä muutosten hälytysrajat (Dunnicliff 1988). Mittaustulosten epävarmuus tulee esittää yhdessä mittaustulosten kanssa, mikäli mittauserävarmuutta ei voida pitää merkityksettömänä (CEN-WI 00341066 2012).

3.5 Raportointi

Asennusraportti tulisi laatia heti mittausjärjestelmän käyttöönoton jälkeen. Asennusraporttiin sisällytetään tietoja mittauskohteesta ja -järjestelystä, kuten projektin omistaja, sijainti ja nimi, mittauksista vastaavan yrityksen ja henkilön nimi sekä tiedot asennuksesta ja käyttöönotosta. (CEN-WI 00341066 2012.)

Tulosten tulkinnan jälkeen tulisi koota väliraportti. Raportti sisältää päivitetyt kuvaajat ja huomiot viimeisimmistä muutoksista ja arviot niiden syistä. Siihen tulisi myös kirjata suositellut toimenpiteet. Raportti tulee välittää henkilöille, jotka vastaavat mahdollisten muutosten käytäntöön panosta. Tiedot voidaan välittää aluksi suullisesti, mutta väliraportti tulee tehdä tämän lisäksi myös kirjallisena. (Dunnicliff 1988.)

Monitorointiraportti sisältää kaikki kohteen monitorointiin liittyvät asiat ja perustelut korjaavien toimenpiteiden käytölle. Monitorointiraportin pitäisi tarjota vastaus alun perin selvitettäviin asioihin, joiden vuoksi mittauksia suoritettiin. Tämän lisäksi raporttiin olisi hyvä sisällyttää kohteen monitorointia koskevat parannusehdotukset, joista on hyötyä seuraavien kohteiden monitorointia suunniteltaessa. Monitorointiraportin tulisi sisältää (Dunnicliff 1988, CEN-WI 00341066 2012)

- alkuperäinen ongelma, joka pyritään selvittämään
- monitorointi suunnittelusta tulkintaan
- mittausten tärkeimmät tulokset
- arvio mittausten epävarmuudesta
- huomiot asioista, jotka voivat olla tärkeitä tulosten arvioinnin kannalta
- raportin laatimisen paikka ja aika
- monitorointiprojektista vastaavan henkilön nimi ja allekirjoitus.

3.6 Vastuunjako

Monitorointiprojektissa toteutettavat työvaiheet, mittausjärjestelyn suunnittelusta tulosten tulkintaan, jaetaan tavallisesti useammalle taholle. Jokaiselle monitorointiin liittyvälle osapuolelle pitäisi osoittaa oma vastuualueensa, jotta jokaisella on selvä kuva omista velvoitteistaan eri vaiheissa ja osa-alueissa. Vastuut jaetaan kunkin osapuolen osaamisen ja taustan mukaan, mutta yksi taho voi hoitaa useampaakin tehtävää tai osa-aluetta. (USACE 1995.) Tavallisesti monitorointiprojektiin osallistuvat tahot ovat tilaaja, suunnittelijakonsultti, urakoitsija ja mittausjärjestelmien asiantuntija. Taulukossa 2 on esitetty tilaajan toimeenpaneman monitorointiprojektin mahdolliset vastuunjaot. Osapuolien tehtävät ja vastuut tulee päättää tapauskohtaisesti ja myös riippuen osallistuvista tahoista. Urakoitsijalle annettavat vastuut riippuvat urakoitsijan taloudellisista intresseistä ja saaduista kokemuksista. Urakoitsijan vastuuta voidaan kasvattaa, jos se on edellä mainittujen syiden mukaan perusteltua. Tilaajan määräämä monitorointi kuitenkin koetaan urakoitsijan mielestä usein häiritseväksi tekijänä ja urakoitsijalle annettavat vastuut tulee tällöin pitää mahdollisimman vähäisinä. Mikäli seurannan on tilannut urakoitsija, on myös vastuu tällöin urakoitsijalla. (Dunnicliff 1988.) Koko monitorointiprojektin valvonnasta tulisi vastata kokenut geotekninen suunnittelija tai monitorointiin perehtynyt henkilö (USACE 1995).

Taulukko 2. Seurannan mahdolliset vastuulliset tahot (Dunnicliff 1988).

Tehtävä	Vastuullinen taho			
	Tilaaaja	Suunnitteli-jakonsultti	Mittausjärjestelmien asiantuntija	Urakoitsija
Monitorointiohjelman laatiminen	x	x	x	
Mittauslaitteiden valmistelu		x	x	
Asennus			x	x
Ylläpito ja kalibrointi			x	x
Mittausaikataulun laatiminen		x	x	
Mittautulosten keruu			x	x
Käsittely ja esittäminen			x	
Tulkinta ja raportointi		x	x	
Toimenpiteistä päättäminen	x	x		

3.7 Mittausten automatisointi

Automatisoinnista on suurin hyöty mittauskohteissa, jotka vaativat tiheätä ja säännöllistä mittausta tai laitteisto on asennettu vaikeapääsyiseen kohtaan. Automatisoidun mittauslaitteiston hankintakustannus on yleensä korkeampi, mutta matalammat käyttökustannukset tasoittavat tilannetta. Pitkäaikaisessa seurannassa automatisoitu mittaus voi olla kokonaiskustannuksiltaan jopa halvempi tai ainakin hinnaltaan vertailukelpoinen. Samalla mittauksiin tarvittavan työvoiman määrä vähenee ja resursseja vapautuu muuhun työhön.

Suurin osa mitattavista parametreista on mahdollista mitata myös automaattisella mittauslaitteistolla. Automatisoitu mittauslaitteisto vaatii toimiakseen useamman järjestelmän osan virheetöntä toimintaa. Mittausanturit, tallennin, tiedonsiirtomenetelmä, sähkönsyöttö ja tulosten tallennus tulee suunnitella kohteeseen sopiviksi, jotta voidaan varmistaa laitteiston toimivuus. (USACE 1995.)

Automatisoitu mittauslaitteiston etuja ovat ihmisestä riippuvien mittausvirheiden poistuminen, mahdollisuus suureen mittaustiheyteen, hälytykset sallittujen rajojen ylittyessä ja mahdollisuus hallita mittauslaitteistoa etäyhteydellä. Vastaavasti laitteiston heikkouksia ovat suuri mittaustiedon määrä, hankintahinta ja mahdollisesti korkeat käyttökustannukset, laitteistoa ei tarkisteta silmämääräisesti ja vikatilanteissa korjaaminen voi olla hidasta. (USACE 1995.)

3.8 Kustannukset

Monitoroinnin kustannusarvio tehdään niiden tietojen pohjalta, jotka ovat tulleet esiin suunnittelun aikana. Samalla tulee tarkistaa ovatko kustannukset järkevät suhteessa saavutettavaan hyötyyn. (Dunnicliff 1988, Arsenio et al. 2009.) Monitoroinnin ei tarvitse säästää kustannuksia, jotta se voidaan toteuttaa ja perustella. Kustannusten yhteydessä tulee huomioida myös ylläpidosta ja tulosten käsittelystä aiheutuvat kustannukset. (USACE 1995.)

Monitoroinnista saatavat hyödyt on mahdollista kertoa ja perustella, mutta hyötyjen arvon määrittäminen on huomattavasti haastavampaa. Marr (2007) esittää yhden tavan arvioida riskejä verrattuna mittauskustannuksiin. Laskenta perustuu siihen, että mittauksilla voidaan pienentää jonkin ajatellun vaurion riskiä. Riskin toteutumisesta aiheutuvalle vauriolle määritetään kustannus, joka kerrotaan riskin alenemisen todennäköisyydellä. Jos mittauksen kustannus on pienempi kuin vaurion kustannuksen ja riskin alenemisen tulo, kannattaa mittaus suorittaa. Laskentatavan avulla voidaan karkeasti arvioida mittauksiin käytettäviä kustannuksia. Mittauksista todellisuudessa saavutettava hyöty voi olla moninkertainen kustannuksiin verrattuna.

4 Standardit

4.1 EN 1997-1 ja seurantamenetelmä

EN 1997-1 -standardin luku 4.5 sisältää yleisiä huomioita monitoroinnin käytöstä ja tulosten tulkinnasta sekä mitattavista muutoksista ja kohteista. Standardi sisältää erillisen ohjeistuksen penkereen yhteydessä tehtävistä geoteknisistä mittauksista ja viittausten ankkuroinnin yhteydessä sovellettaviin standardeihin. Standardin liitteessä J on myös kirjattu muutamia huomioita monitoroinnin suorittamisesta. (SFS-EN 1997-1 2004.)

EN 1997-1 -standardissa on lyhyesti käsitelty seurantamenetelmän tarkoitusta maarakennuskohteissa ja esitetty muutamia huomioita monitorointiin liittyvien mittauksen käytöstä. Standardin liitteenä on lisäksi tarkistuslista rakentamisen seurannan mittauksiin liittyen. Standardissa on myös mahdollistettu seurantamenetelmän käyttö haastavissa kohteissa ja esitetty muutamia vaatimuksia koskien sen käyttöä. (SFS-EN 1997-1 2004.)

Seurantamenetelmän käyttöön tarkempi ohjeistus löytyy esimerkiksi julkaisusta CIRIA report 185: The observational method in ground engineering: Principles and applications (Patel 2005).

4.2 CEN-WI 00341066

Standardiluonnoksen osa General rules työnimeltä CEN-WI 00341066, käsittelee tarkailumittauksien käyttöä geoteknisten rakenteiden monitoroinnissa. Standardi on vielä luonnosvaiheessa. (CEN-WI 00341066 2012, Halkola 2012.) Tavoitteena on luoda geoteknisen monitoroinnin eri osa-alueita koskeva standardi (Dunnicliff 2011). General rules -osastandardia voidaan soveltaa myös EN 1997-1 mukaisen seurantamenetelmän yhteydessä (CEN-WI 00341066 2012). Seurantamenetelmiä koskevat osastandardit tulevat valmistuessaan täydentämään standardia. Menetelmiä koskevat osuudet tulevat sisältämään asentamiseen ja mittaamiseen liittyvää ohjeistusta. (Halkola 2012.)

4.3 Saksa

Saksassa on julkaistu monitorointia käsittelevä DIN 4107 Geotechnical measurements -standardi, joka sisältää neljä osaa (DIN 2012):

1. Principles
2. Extensometer and convergence tape measurements
3. Inclinometer and deflectometer measurements
4. Measurements with pressure cells

Standardin 1. osa käsittelee geoteknistä monitorointia yleisesti. Standardin osat 2–4 on tarkoitettu käytettäväksi osan 1 sekä EN 1997-1 ja EN 1997-2 yhteydessä. (Bock & Thaher 2007, DIN 2012.)

4.4 Suomi & pohjoismaat

Suomessa on julkaistu SFS-EN ISO 22475-1 -standardi, joka käsittelee pohjavesimittauksia ja niiden suorittamista (SFS-käsikirja 179-3 2009).

4.5 Yhdysvallat

ASTM on julkaissut standardeja, jotka käsittelevät osaa monitoroinnissa käytettävien mittausten menetelmien asentamista ja käyttöä, joista pohjavesimittauksia on käsitelty laajimmin (Taulukko 3). Muutamat näistä standardeista käsittelevät tietyn menetelmän käyttöä monitoroinnissa. Varsinaisesti monitorointia koskevia standardeja on julkaistu siirrettävän inklinometrin ja painumalevyn osalta. (ASTM International 2013).

AASHTO on myös julkaissut muutamia standardeja, jotka koskevat sekä monitoroinnissa käytettäviä menetelmiä sekä näiden mittausten menetelmien käyttöä monitoroinnissa. Standardeja on julkaistu ainakin siirrettävän inklinometrin käytöstä monitoroinnissa sekä huokospaineen mittaamisesta. (AASHTO 2013.)

Taulukko 3. Ohjeistukset ja standardit Yhdysvalloissa (Muokattu: NDOT 2005).

SUBJECT	ASTM	AASHTO
Pore Pressures in Soils		T 252
Standard Practice for Installing, Monitoring, and Processing Data of the Traveling Type Slope Inclinator		R045-08-UL
Standard Practice for Extensometers Used in Rock	D 4403	
Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells in Aquifers	D 5092	
Standard Practice for Static Calibration of Electronic Transducer Based Pressure Measurement Systems for Geotechnical Purposes	D 5720	
Monitoring Well Protection	D 5787	
Standard Test Method for Calibrating Linear Displacement Transducers for Geotechnical Purposes	D 6027	
Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe-Type Inclinator	D 6230	
Standard Guide for Installing and Operating Settlement Platforms for Monitoring Vertical Deformations	D 6598	
Standard Practice for Verifying Performance of a Vertical Inclinator Probe	D 7299	
Standard Practice for Pre-Installation Acceptance Testing of Vibrating Wire Piezometers	D 7764	

5 Monitorointi Suomessa

5.1 Nykytilanne

Suomessa monitorointi on pienessä roolissa verrattuna monien muiden maiden tilanteeseen. Mittauksiin käytetyt rahamäärät ovat projektien kustannuksiin suhteutettuna tavallisesti erittäin vähäisiä. Toisaalta Suomessa voidaan sanoa olevan geotekniikan näkökulmasta yksi maailman huonoimmista maaperistä, mutta yksi parhaista kallioperistä, joka on lisäksi verrattain lähellä maanpintaa. Tästä johtuen Suomessa käytettävät rakentamistavat ovat erilaisia ja kaikkia muualla maailmassa käytettyjä ratkaisuja ei voida soveltaa Suomessa, jonka vuoksi monitorointitarve on erilainen kuin muualla. (Halkola 2013.)

Monitorointi ei ole rutiinia Suomessa, lukuun ottamatta pohjavesimittauksia. Tavallisesti suunnittelija ehdottaa mittauksia kohteeseen, jos mittaukset on havaittu tarpeellisiksi. Kuitenkin mittausten suorittamisesta päättää osapuoli, joka rahoittaa hankkeen. Monitorointi voidaan myös velvoittaa tilaajan toimesta, kuten on tehty Länsimetron yhteydessä. Tilaajan velvoittamisissa kohteissa suunnittelijakonsultit ja urakoitsijat ovat joutuneet tekemään tarkkailumittauksia, mikä on tuonut osapuolille kokemusta. Saatu kokemus on myöhemmin voitu hyödyntää muiden monitorointikohteiden yhteydessä. Mittaukset voivat olla myös urakoitsijan aloitteesta tehtyjä, mikäli urakoitsija käyttää esimerkiksi seurantamenetelmän mukaista suunnittelua. (Halkola 2013.)

Suomessa monitorointiin liittyen suurin ongelma on suunnittelijoiden tietämättömyys ja näkemyksen puute. Mittauslaitteiden asentajien ja mittauskonsulttien osaaminen ei ole yhtä merkittävä ongelma. Suunnittelijoiden koulutus monitorointiin liittyen on puutteellista, koska Suomessa osaajia on melko vähän. Suunnittelijat oppivat lähinnä työssä kokeneemmilta työntekijöiltä. Suomen ohjeistuksen tilanne on heikko ja nykyisin ohjeistuksiin ja käsikirjoituksiin on vaikea saada tekijöitä. Suomeen on kopioitu Ruotsista geotekniikkaan liittyviä malleja ja ohjeistuksia, joka on mahdollista, koska olosuhteet ovat samankaltaiset Ruotsissa ja Suomessa. (Halkola 2013.)

Monitoroinnista saatavia hyötyjä ja mittauksiin käytettyjä rahoja hukataan, kun tuloksiin ei perehdytä ennen kuin ongelmia havaitaan. Tähän liittyy myös asenne, että mitataan, koska mittauksia kuuluu tehdä. Mittaukset pyritään myös monesti lopettamaan heti, kun mittauksia vaativa rakentamisvaihe on saatu suoritettua, koska mittausten jatkaminen mielletään ylimääräiseksi kustannukseksi. (Halkola 2013.)

Muualla maailmassa tiettyjen kohteiden, kuten maapatojen, monitorointi on tavallista ja hallittua sekä mittauksiin on varattu riittävästi varoja. Myös kyseisten kohteiden suun-

nittelijat ovat tietoisia monitoroinnin asettamista vaatimuksista ja osaavia mittauskonsultteja on saatavilla. Suomessakin kalliorakentamisessa monitorointia hyödynnetään paremmin ja mittauksen hallinta on edellä maarakentamista. Tähän vaikuttaa osaltaan kalliorakentamisen selkeämpi ja yhtenäisempi toimintaympäristö, joka on tuonut alalle myös mittauksia toteuttavia yrityksiä. (Halkola 2013.)

Mittaustiedon hallinta on yksi monitoroinnin ongelmista. Tavallinen taulukkolaskenta-ohjelma on monesti sopiva yksittäisten mittauspisteiden käsittelyyn. Useamman mittauksen havainnollinen esittäminen vaatisi paikkatietoon sidottua tietokantaa, jonka tulisi olla käytettävyydeltään lisäksi suunnittelijaystävällinen. Mittaustiedon hallintaan on edelleen vähän hyviä ja käyttökelpoisia ohjelmistoja. Mittaustiedon siirtäminen järjestelmästä toiseen tai vanhojen mittauksen hyödyntäminen uusien mittauksen lisänä on usein ongelmallista, sillä eri tiedostojärjestelmät eivät yleensä ole yhteensopivia. (Halkola 2013.)

Suomessa seurantamenetelmää on käytetty ainakin Helsingissä Arabianrannan rantapenkereen tukemisessa. Arabianrannassa valittiin tietoisesti kevyempi tukirakenne ja siirtymiä seurataan aktiivisesti. Mittaustulosten perusteella on arvioitu tukiseinän toimintaa ja toistaiseksi siirtymien on todettu olevan kohtuullisia. Mikäli siirtymien todetaan kasvavan yli hyväksyttävien rajojen, harkitaan tukiseinärakenteen muuttamista toisen tyyppiseksi. (Halkola 2013.)

5.2 Käytetyimmät mittausmenetelmät

Painumien vaaitusta on tehty kauan ja mittaustarkkuudet ovat olleet riittäviä käyttötarkoituksiin. Tarkkavaaitus on aloitettu Suomessa noin 1960-luvulla, jolloin rakentamisen vaikutukset tulivat tietoisuuteen ja mittaaminen tuli tärkeämmäksi esimerkiksi savimaiden painumien ja jokilaaksoissa tapahtuneiden sortumien johdosta. Painumalevymittauksia käytetään Suomessa ja mittaukset ovat yleisesti onnistuneet. Painumaletkua on myös käytetty, mutta tarkkuudet ovat olleet senttimetriluokkaa, mutta tarkempia laitteistojakin on saatavilla ja käytössä. (Halkola 2013.)

Sivusiirtymien mittaamiseen soveltuva inklinometri otettiin käyttöön Suomessa 1970-luvulla, kuitenkin tulosten käsittely oli vielä ongelmallista. Automaattinen tietojen käsittely mahdollisti mittaustulosten tehokkaamman käsittelyn ja kuvaajien tulostamisen. Inklinometrimittauksissa mittaustieto oli aikaan sidottua, joka oli kehitysaskel erillisistä mittauksista. Sivusiirtymän mittaamiseen soveltuvia mittauslaitteistoja tuli kaupallisesti saataviksi 1980-luvun lopulla. Mittaustiedon hallinta oli yhä ongelma, joka pyrittiin ratkaisemaan tietokantajärjestelmien avulla. (Halkola 2013.) Nykyään manuaalisten mittauslaitteistojen ohella on tarjolla myös automaattisia inklinometrilaitteistoja, joihin on mahdollisuus liittää myös etäluenta, jolloin tulokset ovat saatavilla reaaliaikaisesti.

Avoimet pohjavesimittaukset ovat yksi eniten käytetyistä mittausmenetelmistä Suomessa, mutta myös huokosvedenpainetta mitataan. Suomen maaperän savi poikkeaa muualla Euroopassa olevista maalajeista vedenjohtavuudeltaan. Suomalaisissa savissa oleva vesi täytyy ilmaista huokosvedenpaineen avulla, kun maailmalla tavallinen ajatusmalli on, että pohjavettä on kaikkialla. Myös ohjeistukset on tehty huomioiden, että pohjavettä voidaan mitata kaikista maalajeista. Huokosvesimittauksissa ei ole Suomessa ymmärretty aina huomioida, että onko vedenpaine hydrostaattinen vai ei. Huokosvesi on rakennetussa ympäristössä monesti yli- tai alipaineista, ja kun huokosvedenpaine oletetaan tällöin hydrostaattiseksi, johtaa se virheellisiin painumalaskentatuloksiin. Huokosvedenpaine tulisi mitata useammasta kerroksesta, jolloin painetilasta saataisiin parempi käsitys. Kuitenkin huokosvedenpaineen mittaaminen koetaan kalliiksi ja mittaus suoritetaan saven alta vettäjohtavasta kerroksesta, joka johtaa puutteellisen tietämyksen yhteydessä väärin johtopäätöksiin. Huokosvedenpaineen mittaaminen ja tulkinta hallitaan Suomessa yleensä huonosti. (Halkola 2013.)

Maanpaineen mittaaminen ei ole ollut erityisen yleistä Suomessa. Mittauksia on alettu tehdä Suomessa 1950–1960-luvuilla, jolloin maarakenteet ovat olleet hyvin lähellä nykyään käytettäviä rakenteita. Maanpaineen mittaus voidaan välttää suunnittelemalla rakenne sellaiseksi, että maanpainetta ei tarvitse mitata, joka on osaltaan vaikuttanut maanpainemittausten käyttöön. (Halkola 2013.)

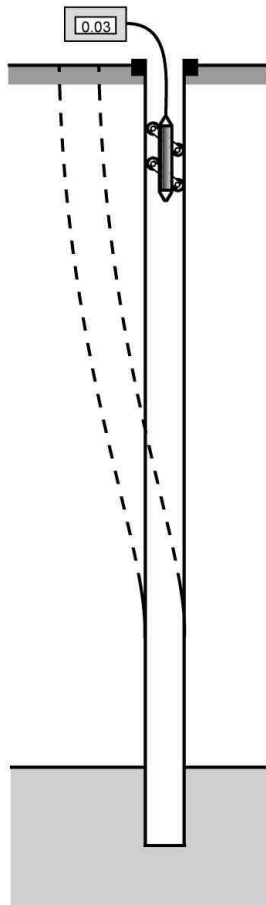
6 Mittausmenetelmien kuvaukset

6.1 Pysty- ja vaakasiirtymät

6.1.1 Inklinometri

Inklinometri on maaperän siirtymien monitorointiin yleisesti käytetty mittauslaite, joka mittaa asentoa suhteessa maan vetovoimaan (Kuva 5) (Luomala 2010). Inklinometrillä mitataan asennetun inklinometriputken suhteen poikkisuuntaisia siirtymiä. Tavallisesti inklinometri asennetaan pystysuoraan, jolloin sillä mitataan vaakasuuntaisia siirtymiä, mutta myös vaaka-asennus ja pystysuuntaisten siirtymien monitorointi on mahdollista (Liite 1). (Dunnicliff 1988, Luomala 2010.) Inklinometrin tyypillisiä mittaushkohteita ovat (Dunnicliff 1988)

- sortuman liukuvyöhykkeen määrittäminen
- vaakasiirtymän nopeuden ja suuruuden määrittäminen maaperässä ja maarakenteissa, kuten patopenkereissä, pehmeälle maaperälle tehdyissä penkereissä ja kaivannoissa
- siirtymien mittaaminen tukiseinissä, paaluissa ja tukimuureissa.

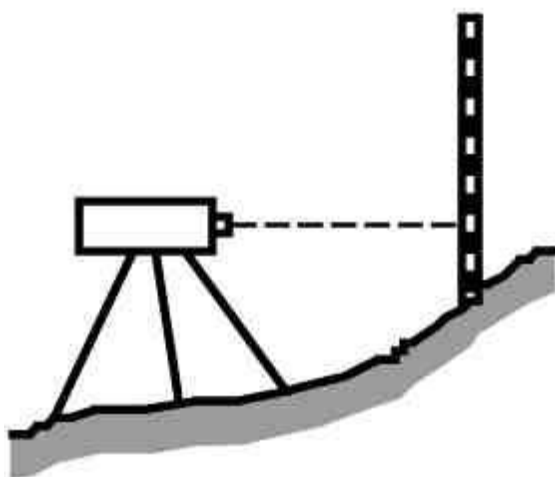


Kuva 5. Inklinometrin toimintaperiaate (CEN-WI 00341066 2012).

Inklinometrille ilmoitettu tarkkuus on $\pm 0,25$ mm yksittäistä mittausrvoa kohden ja ± 6 mm 50 mittausta eli 25 m putkea kohden. Valmistajan mukaan paras saavutettavissa oleva tarkkuus 50:tä mittausta kohden on $\pm 1,4$ mm. (Slope Indicator 2009a.) Helsingin kaupungin toimesta inklinometrin tarkkuutta on tutkittu vuonna 2001. Mittauksiin on käytetty 21 m pitkää kallioon porattua inklinometriputkea. Tällöin havaittiin, että inklinometrin tarkkuus on parempi mittaussuunnassa, kuin kohtisuorassa mittaussuuntaan. Mittausten suhteellinen virhe oli enintään 1 mm mittaussuunnassa ja 2 mm mittaussuuntaan kohtisuorassa 21 m matkalla. Mittauksen absoluuttinen virhe oli huomattavasti suurempi. Mittauslaitteen ja mittauskohdan lämpötilaeron vaikutus todettiin merkittäväksi, 20 °C lämpötilaeron vaikutus tuloksiin oli enimmillään $0,25\text{ mm} / 0,5\text{ m}$. Mittauslaitteen lämpötilan tulee antaa tasaantua ennen mittausten suorittamista, jotta lämpötilaero ei aiheuta virhettä mittaukseen. (Savolainen & Halkola 2001.) FinMeasin automaattinklinometrin tarkkuutta on tutkittu Tampereen teknillisen yliopiston toimesta ja mittaustarkkuuden on havaittu olevan noin 1 mm metriä kohden. Lämpötilariippuvuuden havaittiin olevan noin $0,01\text{ °C}$, mutta tästä aiheutuvan virheen todettiin olevan vähäinen, koska lämpötilamuutokset maan sisässä ovat pieniä. Käytännön mittaustarkkuuden todettiin olevan verrattavissa manuaali-inklinometriin. (Luomala 2008.)

6.1.2 Vaaitus

Vaaituksessa verrataan mitattavan kohteen pystysuuntaista asemaa kiintopisteeseen. Vaaituksessa käytetään optista laitteistoa, joka asetetaan vaakasuoraan (Kuva 6). Mittaamisessa käytetään apuna mittalattaa, jolla korkeusero mittauskohdeiden ja vaaituskojeen välillä voidaan määrittää. Siirtymä lasketaan kiintopisteen ja mittauspisteen korkeuseron muutoksesta. Saavutettava tarkkuus riippuu ainakin vaaituskojeesta, mittausetäisyydestä ja ympäristöolosuhteista. (Savolainen & Halkola 2001.)



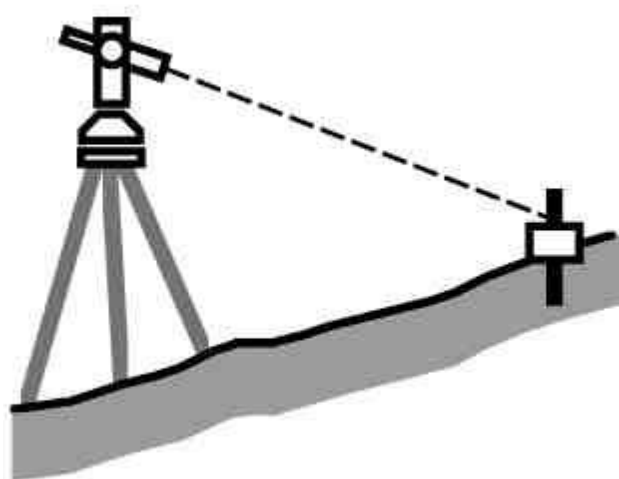
Kuva 6. Vaaituskojeen toimintaperiaate (CEN-WI 00341066 2012).

Helsingin kaupungin toimesta on selvitetty Leica NA3003 -tarkkavaaituskojeen mittaustarkkuutta. Mittauksista havaittiin, että valmistajan ilmoittama keskivirhe $0,4\text{ mm/km}$

on mahdollista saavuttaa huolellisella mittauksella. Mittaustarkkuus yksittäisessä mittauksessa on noin 3–5 kertaa keskivirheen suuruinen. Mittaustarkkuus oli mittauksissa parempi, jos etäisyys mittaushaasteeseen ja kiintopisteeseen olivat likimain samansuuruiset. Tarkkailumittauksissa on kuitenkin syytä käyttää joka mittauskerralla samaa laitteistoa, sillä mittauslaitteistojen absoluuttinen virhe heikentää muuten mittaustarkkuutta. (Savolainen & Halkola 2001.)

6.1.3 Takymetri

Takymetrillä mitattaessa siirtymät saadaan määritettyä kolmen koordinaatin suunnassa (Luomala 2010). Takymetrillä varten mitattavaan haasteeseen voidaan asentaa kiinteästi prisma (Kuva 7), jolloin päästään parempaan tarkkuuteen, mutta mittaaminen on mahdollista myös ilman prismoja (Leica Geosystems 2009, Luomala 2010). Mittauslaitteen ja mitattavan pisteen välillä täytyy olla näköyhteys. Takymetrimittaus voidaan tehdä käsin tai robottitakymetrillä, joka mahdollistaa mittausten tekemisen automaattisesti ja reaaliaikaisesti. (Luomala 2010.)



Kuva 7. Takymetrin toimintaperiaate (CEN-WI 00341066 2012).

Leica TS30 manuaalitakymetrille valmistaja ilmoittaa tarkkuudeksi $0,6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ prismaan mitattaessa, jossa ppm tarkoittaa tarkkuuden heikkenemistä mittausetäisyyden mukaan miljoonasosalla mittausetäisyydestä. Etäisyys haasteeseen voi olla yli kilometrin prismaan mitattaessa. (Leica Geosystems 2009.) Kiinteästi asennettavien robottitakymetrioiden mittaustarkkuus on jopa alle 1 mm. Robottitakymetrioiden huonona puolena on korkea hankintahinta ja mahdolliset säätöihin liittyvät ongelmat. (Luomala 2010.)

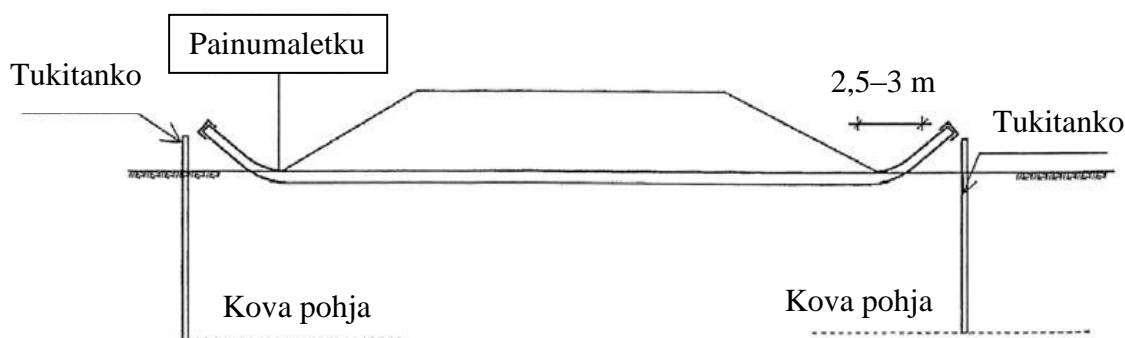
6.1.4 Painumalevy

Painumalevyllä seurataan maan pinnan tai maakerroksen painumaa. Painumalevy koostuu levystä, johon on kiinnitetty tanko. Levy asetetaan joko maan pinnalle tai upotetaan maahan, siten että tanko jää näkyviin maan pinnan yläpuolelle. Tanko voidaan asentaa suojaputkeen, jolloin mahdollinen täyterakroksen painuma ei vääristä mittausta. Painu-

ma mitataan vertaamalla tangon korkeutta kiinteään vertailupisteeseen. (Munro & MacCulloch 2006.)

6.1.5 Painumaletku

Painumaletkulla voidaan mitata painumaa tai selvittää jatkuva painumakuvaaja poikkeileikkauksesta. Painumaletku asetetaan tutkittavan pohjamaan varaan ja rakenne, kuten penger rakennetaan päälle (Kuva 8). (Liikennevirasto 2011b.) Nesteellä täytetyn letkun paine mitataan paineanturilla ja verrataan painetta tunnettuun kiintopisteeseen. Paine letkussa kasvaa lineaarisesti syvyyden kasvaessa, josta voidaan laskea syvyysuuntainen siirtymä. Paineanturi voi olla liikuteltava tai kiinteästi letkuun asennettu, jolloin useita antureita voidaan asentaa samaan letkuun. (Luomala 2010.) Liikuteltavalla anturilla voidaan mitata nestepaine letkussa useasta kohdasta (Luomala 2010, Liikennevirasto 2011b). Kiinteällä anturilla mittausepä tarkkuudesta johtuva virhe on liikuteltavaa anturia pienempi. Painumaletkun mittauksen tarkkuuden on havaittu olevan noin ± 10 mm. (Liikennevirasto 2011b.) Helsingin kaupungilla käyttämän painumaletkulaitteiston tarkkuuden on havaittu olevan noin ± 20 mm liikuteltavaa anturia käytettäessä (Savolainen & Halkola 2001).



Kuva 8. Painumaletkun sijoittaminen penkereessä (Liikennevirasto 2011b).

6.1.6 Ekstensometri

Ekstensometrillä mitataan kahden pisteen välistä etäisyyden muutosta. Ekstensometreissä on eri toimintaperiaatteella toimivia mittauslaitteita, mutta kaikki mittaavat yksittäisten pisteiden liikettä tiettyyn vertailupisteeseen nähden. Ekstensometrillä voidaan mitata etäisyyden kasvua tai pienenemistä riippuen käytettävästä laitteistosta ja niitä valmistetaan useata käyttötarkoitusta varten. (Dunnicliff 1988.) Tavallisimpia sovellutuksia ovat betoni- ja kalliorakenteiden pintahalkeamat sekä maan painumien ja kallion halkeamien mittaaminen kairareiän suunnassa (Dunnicliff 1988, Slope Indicator 2012). Ekstensometrin tarkkuus on tyypillisesti muutamien millimetrien luokkaa tai jopa huomattavasti tarkempi riippuen käytettävästä mittauslaitteistosta (Dunnicliff 1988).

6.1.7 Laserkeilaus

Laserkeilaus (LIDAR, Light Detection And Ranging) on mittaamenetelmä, jolla mitataan kohteesta kolmiulotteinen pistepilvi. Laserkeilauksessa mitataan yksittäisten havaintopisteiden etäisyys mittaustalitteesta, joko valon kulkuajan tai vaihe-eron perusteella. Pisteille voidaan laskea koordinaatit, kun tunnetaan etäisyyden lisäksi lasersäteen lähtökulma. Laserkeilain tulee valita mitattavan kohteen etäisyyden, laajuuden ja tarvittavan tarkkuuden perusteella. (Joala 2006, Saarenketo et al. 2012.) Laserkeilausta haittaavia tekijöitä ovat pöly, sade ja sumu (Saarenketo et al. 2012).

Valon kulkuakaa mittaavat laserkeilaimet ovat tarkempia ja pystyvät mittaamaan pidempiä etäisyyksiä, mutta ovat samalla hitaampia, kuin vaihe-eroon perustuvat laserkeilaimet. Huonommasta tarkkuudesta johtuen vaihe-erokeilaimien tuottama pistepilvi on heikkolaatuaisempi. Laserkeilaimet tallentavat pisteiden yhteyteen myös heijastuvan valon intensiteetin, joka riippuu kohteen etäisyydestä ja pinnan laadusta. Tätä tietoa voidaan käyttää hyväksi pistepilven mallintamisessa visuaaliseen muotoon. Visualisointia varten on mahdollista käyttää mittaustalitteessa olevaa kameraa tai erillistä kameraa, jolloin oikeiden värien liittäminen aineistoon on mahdollista. (Joala 2006.)

Yleensä laserkeilaus täytyy suorittaa useasta pisteestä, jotta kaikki kohteen osat saadaan näkyviin, jolloin eri mittausten pistepilvet joudutaan yhdistämään (Joala 2006). Laserkeilaus voidaan suorittaa myös liikkuvalta mittaustalustalta (Saarenketo et al. 2012). Laserkeilauksella tuotetun pistepilven pisteiden välinen etäisyys on pienimmillään 50 m matkalla muutamien millimetrien luokkaa. Pistepilven tiheys mahdollistaa esimerkiksi reunojen tarkemman mallinnuksen. Samalla tulee kuitenkin muistaa, että tiheästä pistepilvestä ei ole hyötyä, mikäli yksittäisten pisteiden tarkkuus on heikko. (Joala 2006.)

6.1.8 Interferometrimittaus

Radar interferometry -tekniikka (InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar) hyödyntävillä talitteilla on mahdollista luoda tutkittavasta kohteesta pintamalli tai havaita kohteessa tapahtuvia liikkeitä. Mittaavan talitteen ja kohteen välillä tulee olla näköyhteys. InSAR-tekniikoiden käyttöä varten mitattavaan kohteeseen tai mittaustalitteeseen ei tarvitse päästä, joka poistaa osan tavallisten mittaustalitteiden rajoituksista. Menetelmän toiminta ei ole myöskään riippuvainen vuorokaudenajasta tai säästä. Mittauksessa mittaustalite lähettää mikroaaltoja, jotka heijastuvat törmätessään kohteeseen. Heijastuneen aallon vaiheen perusteella voidaan määrittää mitatun pisteen etäisyyden muutos. (Alba et al. 2008, Kocierz et al. 2011.)

IBIS (Image by Interferometric Survey) on GBInSAR -tekniikka (Ground based interferometric SAR) hyödyntävä kaupallinen järjestelmä. IBIS-L muodostaa mittaustalitteista yhtenäisen pintamallin, jossa siirtymät on havainnollisesti esitetty. Mittaustalitteisyys on

enintään 1 000 m tai 4 000 m riippuen laitteistosta. Laitteen tarkkuudeksi luvataan $\pm 0,1$ mm. Kenttäkokeessa IBIS-L menetelmällä mitattiin padon muodonmuutosta 37 tunnin ajanjakson aikana, jonka perusteella mittaustarkkuudeksi saatiin $\pm 0,2$ mm 400 metrin etäisyydeltä mitattaessa. (Alba et al. 2008.)

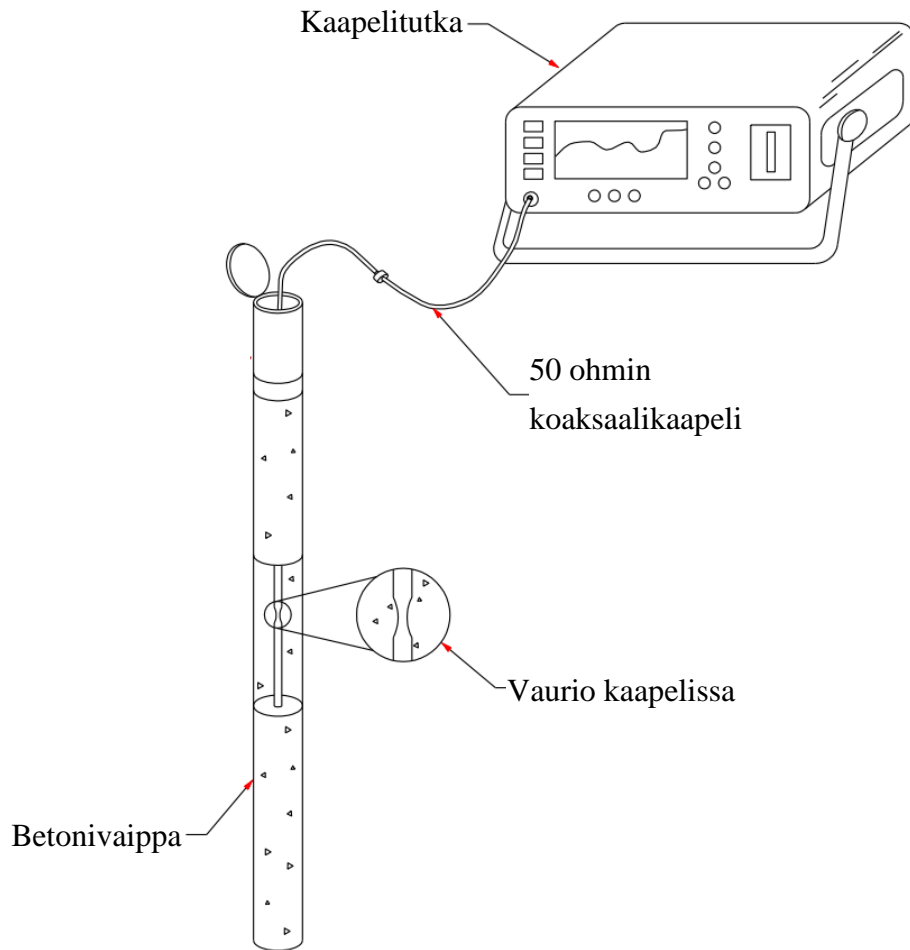
6.1.9 GNSS-satelliittimittaus

Satelliittimittaus tarkoittaa sijainnin määrittämistä satelliittipaikannusjärjestelmien avulla. GNSS (Global Navigation Satellite System) käsittää kaikki nykyiset satelliittipaikannusjärjestelmät. Paikan määrittäminen perustuu lähtökohtaisesti satelliittien lähettämiin radiosignaaleihin. (Maanmittauslaitos 2012.)

Mittaus soveltuu maan pinnalla tapahtuvien siirtymien ja muodonmuutosten monitorointiin. Nykyisin GPS-järjestelmillä on mahdollista päästä jopa alle 10 mm tarkkuuteen. (Naterop 2002.) Satelliittimittaus ei ole sääoloista riippuvainen. Manuaalisiin mittauksiin riittää yksi henkilö, mutta mittaukset voidaan myös automatisoida. Vastaanottimen tulee pysyä paikallaan maan suhteen, jotta tästä ei aiheudu virhettä mittauksiin. (Luomala 2010.)

6.1.10 Kaapelitutkamittaus

Kaapelitutkamittaus (TDR, Time domain reflectometry) on käytetty penkereiden liikkeen monitorointiin. Mittauksessa käytetään koaksaalikaapelia eli antennikaapelia, joka on valettu betonivaippaan ja kaapelitutkaa (Kuva 9). Penkereen liike murtaa betonivaipan, joka aiheuttaa koaksaalikaapeliin muodonmuutoksen. Kaapelitutka lähettää kaapeliin jännitepulsin, joka heijastuu vikaantuneesta kohdasta takaisin. Signaalin heijastuman perusteella voidaan määrittää vikaantuneen kohdan sijainti. Heijastuneen pulsin suuruus kasvaa suhteessa muodonmuutoksen suuruuteen, mistä voidaan arvioida liikkeen suuruusluokka. (Kane & Beck 1999, Luomala 2010.) Menetelmä ei kuitenkaan sovellu pienten muodonmuutosten mittaamiseen. Myöskään liikkeen suuntaa menetelmällä ei pysty määrittämään. Lisäksi routa voi aiheuttaa koaksaalikaapeliin havaittavia vaurioita ja haitata varsinaisten mitattavien muutosten monitorointia. (Luomala 2010.)

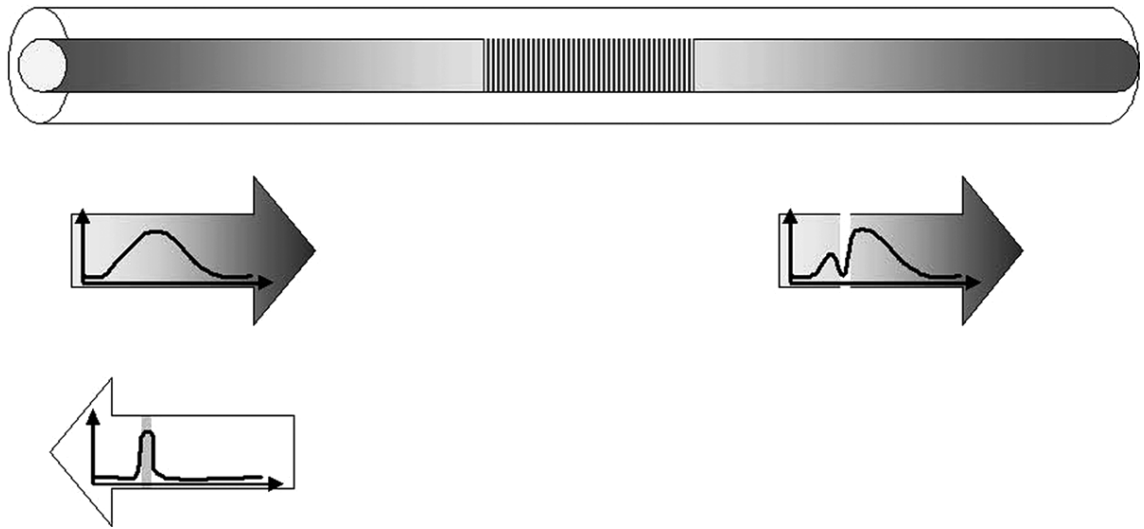


Kuva 9. Havainnekuva kaapelitutkamittausjärjestelystä (ODOT 2008).

6.1.11 Fibre Bragg Grating -valokuituanturi

Fibre Bragg Grating (FBG) -tekniikka on valokuituun perustuva optinen venymämittaus, jonka suurimmat edut tavallisiin venymämittauksiin ovat usean anturin asennus yhteen kuituun ja samalla asennuksen yksinkertaistuminen. FBG perustuu valokuituun, jonka ytimeen on asennettu valoa heijastavia hiloja (Kuva 10). Jännityksistä aiheutuvat valokuidun pituuden muutokset vaikuttavat hilavälien pituuteen. Myös lämpötilan muutokset vaikuttavat suodattuun aallonpituuteen. Mittauksessa valokuituun johdetaan valoa, josta hila heijastaa hilavälille ominaisen spektriä takaisin. Tarkemmin sanottuna kuidussa kulkeva valon kohdatessa Braggin hilan, heijastuu takaisin Bragg-resonanssiaallonpituuden mukainen aallonpituuskaista. Kuidun pituudenmuutokset muuttavat heijastuvaa aallonpituutta. Aallonpituuden muutos mitataan ja muunnetaan vastamaan venymää tai lämpötilan muutosta. Mikäli venymä ja lämpötilanmuutos voi tapahtua samanaikaisesti, täytyy lämpötilakorjausta varten asentaa ylimääräinen FBG-anturi. Yhteen valokuituun on mahdollista sijoittaa useita FBG-antureita, jolloin kullakin anturilla on tyypillinen aallonpituus. Tällöin jokainen anturi voidaan yksilöidä ja tunnistaa mittauksen yhteydessä. Anturit voidaan asettaa tähtimäiseen muodostelmaan, jolloin useita satoja antureita voidaan mitata yhdellä mittauslaitteella. (Brecciaroli &

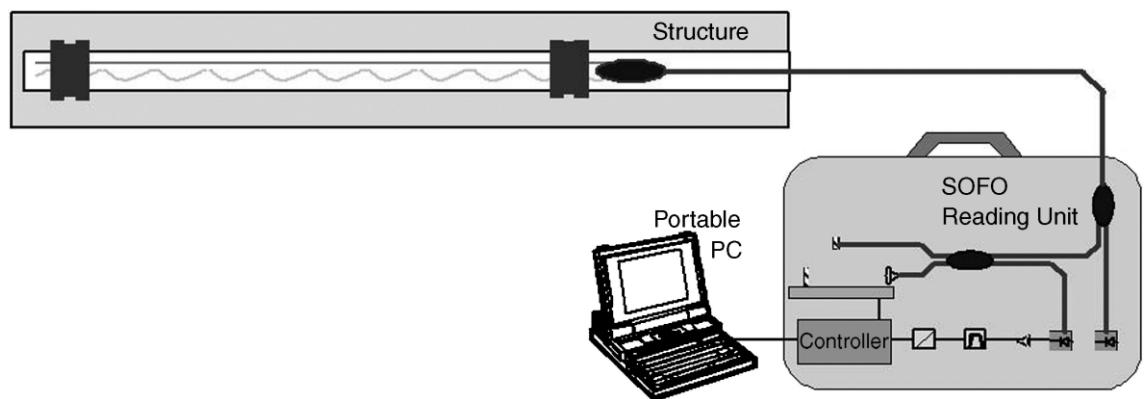
Kolisoja 2004, Glisic & Inaudi 2007.) FBG-anturien tarkkuus on muodonmuutoksen mittauksessa $1\ \mu\epsilon$ ja lämpötilan osalta $0,1\ ^\circ\text{C}$ (Arsenio et al. 2009).



Kuva 10. Fibre Bragg Grating -anturin toimintaperiaate (Glisic & Inaudi 2007).

6.1.12 SOFO-valokuituanturi

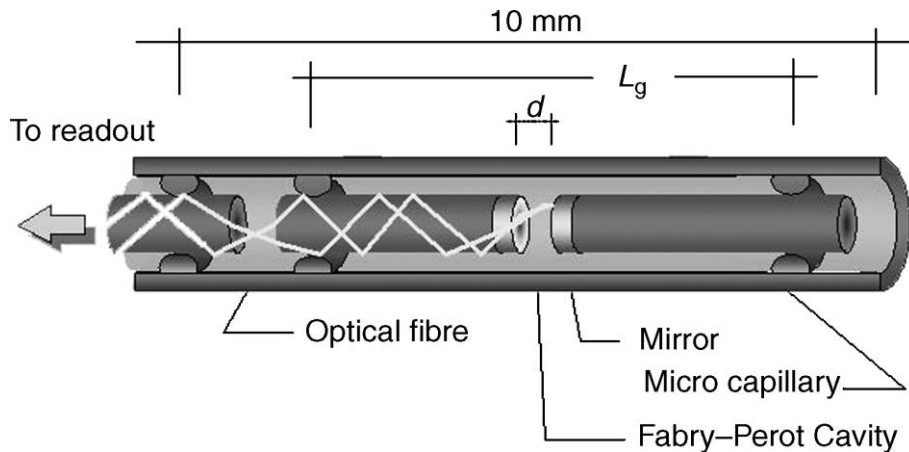
SOFO-antureilla mitataan kahden pisteen välistä suhteellista siirtymää (Brecciaroli & Kolisoja 2004). SOFO-menetelmä on luotettava ja tarkka mittaus, joka ei ole herkkä lämpötilamuutoksille (Arsenio et al. 2009). Pisteet voivat sijaita $0,2\text{--}30\text{ m}$ päässä toisistaan. SOFO-mittaus perustuu kahteen yksimuotovalokuituun, joista toinen on mittakuitu ja toinen on vertailukuitu. Mittakuitu asennetaan kiinteästi rakenteeseen ja vertailukuitu laitetaan irrallisena putkeen mittakuidun viereen. SOFO-mittaus perustuu näiden kahden kuidun pituuseron muutokseen. Pituusero mitataan kahdella interferometrillä, joista ensimmäinen on tehty mitta- ja vertailukuidusta ja toinen interferometri on mittauslaitteessa (Kuva 11). (Brecciaroli & Kolisoja 2004.) SOFO-antureiden tarkkuus on $1\ \mu\epsilon$ (Arsenio et al. 2009).



Kuva 11. SOFO-interferometrin mittausjärjestely (Glisic & Inaudi 2007).

6.1.13 Fabry-Perot-interferometrianturi

Fabry-Perot -interferometrianturilla mitataan kahden pisteen välistä etäisyyden muutosta. Fabry-Perot -tekniikassa kaksi valokuitua on sijoitettu peräkkäin siten, että kuitujen päiden väliin jää mikrometrien suuruinen rako (Kuva 12). Mitattaessa valo heijastuu takaisin raon kohdalta jälkimmäisen kuidun päästä. Heijastuneeseen valoon aiheutuneesta häiriöstä saadaan mittauslaitteella kuitujen päiden etäisyyden muutos. Raon muutos vastaa suoraan kiinnityspisteiden etäisyyden muutosta. (Glisic & Inaudi 2007.)



Kuva 12. Fabry-Perot -anturin toimintaperiaate (Glisic & Inaudi 2007).

6.1.14 Brillouinsirontaan perustuva valokuituanturi

Brillouinsironta-tekniikka (Brillouin scattering sensors) soveltuu pitkän matkan venymä ja lämpötilamittauksiin. Brillouinsironta seuraa, kun lämpötilariippuvat ääniaallot aiheuttavat kulkevaan valoon taajuussiirtymän. Valokuidun paikallinen lämpötila ja venymä saadaan selville taajuussiirtymän avulla. Tutkittavan kuidun pituus voi olla noin 25 km, mutta optisten vahvistimien avulla voidaan päästä satojen kilometrien mittauspituuksiin. Pelkästään lämpötilaa mitattaessa voidaan käyttää tavallista tietoliikennevalokuitua, mutta venymän mittaamista varten tarvitaan erityinen valokuitu ja erillinen valokuitu lämpötilanmittausta varten. (Glisic & Inaudi 2007.)

6.2 Pohjavesimittaukset

6.2.1 Yleiskuvaus

Pohjavesimittaukset suoritetaan joko avoimella tai suljetulla järjestelmällä. Avoimissa järjestelmissä pohjaveden pinnan korkeus määritetään havaintoputkesta. Avoimet järjestelmät soveltuvat maalle tai kalliolle, joiden läpäisevyys on kohtalaisen suuri. Avoimessa järjestelmässä havaintoputken veden pinta vastaa pohjaveden pinnan korkeutta. (SFS-käsikirja 179-3 2009.)

6.2.2 Pohjavedenkorkeuden havaintoputki

Havaintoputkia voidaan käyttää pohjavedenpinnan korkeuden mittaamiseen hyvin vettä läpäisevässä maassa, jossa huokosvedenpaine kasvaa tasaisesti syvyyden mukaan. Havaintoputki asennetaan kairareikään, joka täytetään hiekalla ja pintavesien kulkeutuminen putkeen estetään esimerkiksi täyttämällä reiän yläosa betonilla. Havaintoputki on vettä läpäisevä koko pituudeltaan. Mikäli maalaji on kerroksellista, havaintoputken vedenpinta edustaa tavallisesti parhaiten vettä johtavaa kerrosta. Pohjavedenpinta havaintoputkessa mitataan vedenkorkeusmittarilla. (Dunnicliff 1988.)

Vedenkorkeusmittari

Vedenpinnan korkeus havaintoputkessa ja avoimessa standpipe-huokospainemittarissa mitataan vedenkorkeusmittarilla (Kuva 13). Mittarin sondi lasketaan mittauskaapelin tai nauhan varassa vedenpintaan saakka, jonka jälkeen vedenpinnan etäisyys voidaan lukea kaapelin tai nauhan asteikosta. (Brecciaroli & Kolisoja 2004.)

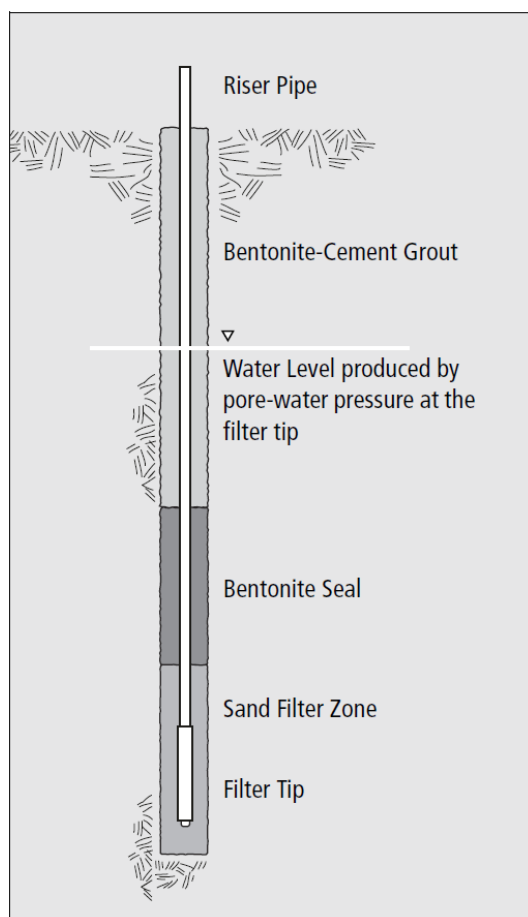


Kuva 13. Vedenkorkeusmittari (vas.), pohjaveden havaintoputki (kesk.) ja standpipe-huokospainekärki (oik.) (Slope Indicator 2004).

6.2.3 Standpipe -huokospainemittari

Standpipe -mittaus soveltuu pohjavedenpinnan tai huokosvedenpaineen monitorointiin, kun ei ole tarpeen mitata nopeita muutoksia. Mittaus soveltuu muun muassa luiskien ja penkereiden stabiliteettia tutkittaessa tehtäviin pohjavesimittauksiin. Standpipe-huokospainemittari koostuu nousuputkesta ja siihen kiinnitetyistä suodatinpäistä, jotka asennetaan kairareikään (Kuva 14). Suodatinpää asennetaan hiekkatäyttöön ja nousuputken kohdalta kairareikä tiivistetään bentoniittilaastilla, joka estää veden kulkeutumi-

sen pystysuoran kulkeutumisen. (Brecciaroli & Kolisoja 2004.) Standpipe-mittarilla mitataan pohjavesiolosuhteita vain suodatinpään kohdalla, eikä koko mittarin matkalla, kuten havaintoputkia käytettäessä (Dunnicliff 1988). Pohjavedenpinnan korkeus huokospainemittarissa mitataan vedenkorkeusmittarilla (Brecciaroli & Kolisoja 2004).



Kuva 14. Standpipe huokospainemittari asennettuna kairareikään. (Slope Indicator 2004).

6.3 Huokospainemittaukset

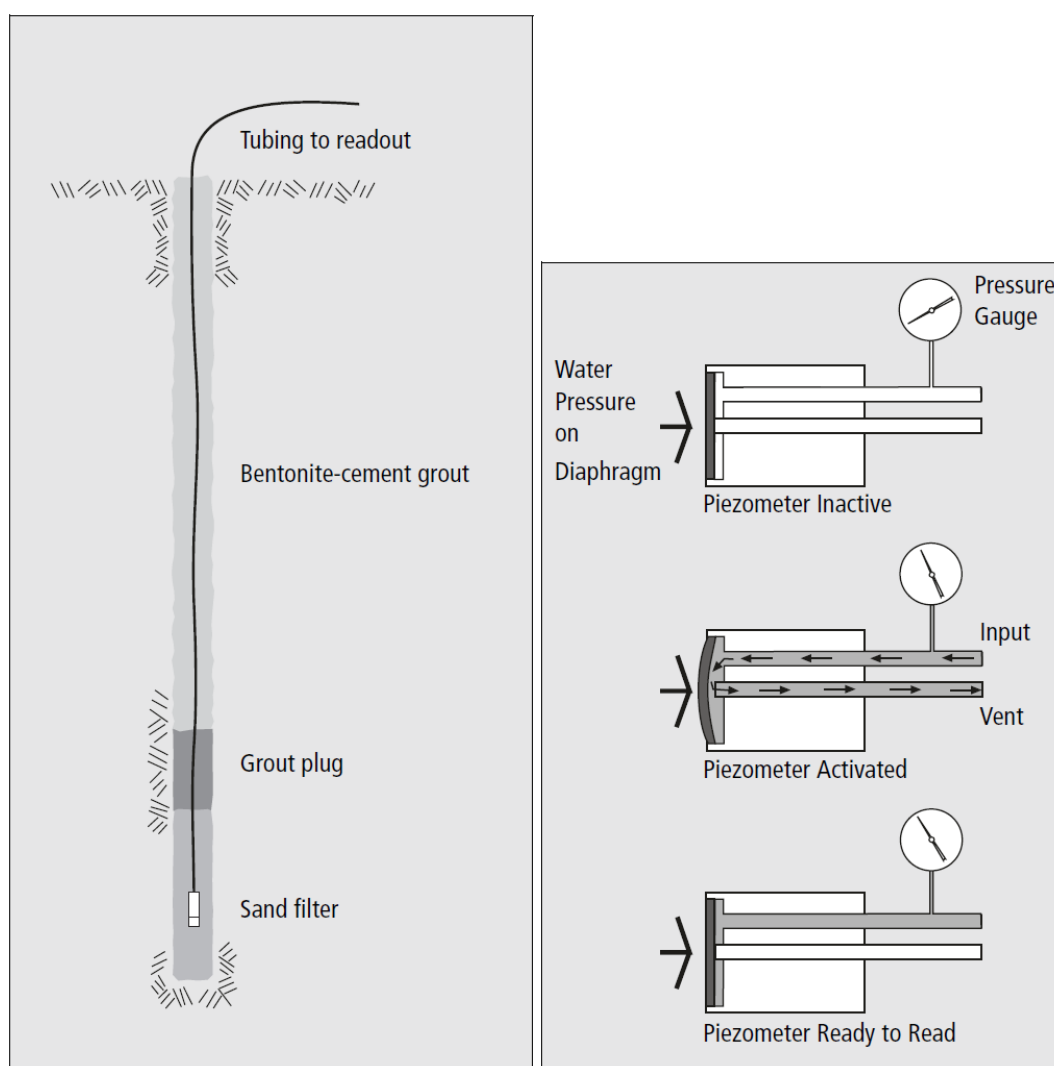
6.3.1 Yleiskuvaus

Suljetuissa järjestelmissä mitataan huokosvedenpaine painemittarilla valitussa pisteessä. Suljetut järjestelmät soveltuvat kaikille maa- ja kalliotyypeille ja niitä tulee käyttää huonosti vettä läpäisevissä materiaaleissa, kuten savessa ja siltissä. Mittaukset voidaan tehdä hydraulisella, pneumaattisella tai sähköisellä mittausjärjestelmällä. (SFS-käsikirja 179-3 2009.) Huokosvedenpainemittauksia käytetään hyväksi vakavuus-, painuma- ja siirtymälaskelmissa (Kairausopas IV 1987).

6.3.2 Pneumaattinen huokospainemittari

Pneumaattinen mittari perustuu kaasun paineen mittaukseen (Kuva 15). Huokospainemittarissa kairareikään on asennettu kaksi letkua, jotka on tiivistetty anturin ylä-

puolelta. Mittari perustuu taipuisaan välikalvoon, jonka toisella puolella on huokosvedenpaine ja toisella kaasunpaine. Mitatessa pneumaattinen mittari liitetään pääteasemaan tai suoraan putkeen, josta kaasua johdetaan syöttöletkua pitkin kalvon taakse, kunnes kaasunpaine ylittää huokosvedenpaineen ja kaasu pääsee vuotamaan välikalvon ohi paluuletkuun. Kaasun syöttö lopetetaan ja kaasun paine laskee, kunnes huokosvedenpaine sulkee välikalvon. Kaasunpaine luetaan painemittarista ja se vastaa mittauspisteessä vallitsevaa huokosvedenpainetta. (Brecciaroli & Kolisoja 2004, Slope Indicator 2004.)



Kuva 15. Pneumaattinen huokospainemittari (Slope Indicator 2004).

6.3.3 Sähköiset huokospainemittarit

Värähdyslankaan perustuva huokospainemittari on sähköinen mittauslaite, joka soveltuu hyvin jatkuvaan mittaukseen ja tarjoaa nopean vasteajan. Huokospainemittarin toiminta perustuu siihen, että välikalvoon kohdistuva paine jännittää värähdyslanka, joka saadaan soimaan ominaistajuudellaan. Taajuuslukema muutetaan näyttölaitteessa huokosvedenpaineeksi. Menetelmää voidaan käyttää muun muassa luiskien ja maapatojen sta-

biliteetin monitorointiin. (Brecciaroli & Kolisoja 2004.) Värähdyslanka-antureita on saatavilla useisiin eri käyttöympäristöihin ja asennustapoihin soveltuvina. Värähdyslanka-huokospainemittareista löytyykin soveltuva malli kaikkiin huokospainemittauskohteisiin. (Slope Indicator 2004.)

Sähköiset huokospaineanturit perustuvat huokospainekärjen sisällä olevaan kalvoon, joka taipuu paineen vaikutuksesta. Kalvon taipuma mitataan venymäliuskoilla, jotka on kiinnitetty kalvoon. Jokainen anturi täytyy kalibroida, jotta tiedetään venymän ja vedenpaineen välinen yhteys ja voidaan määrittää anturikohtainen kalibrointikerroin. Myös ilmanpaineen vaihtelusta aiheutuva paine-ero tulee huomioida mittauksia tehdessä. (Brecciaroli & Kolisoja 2004.)

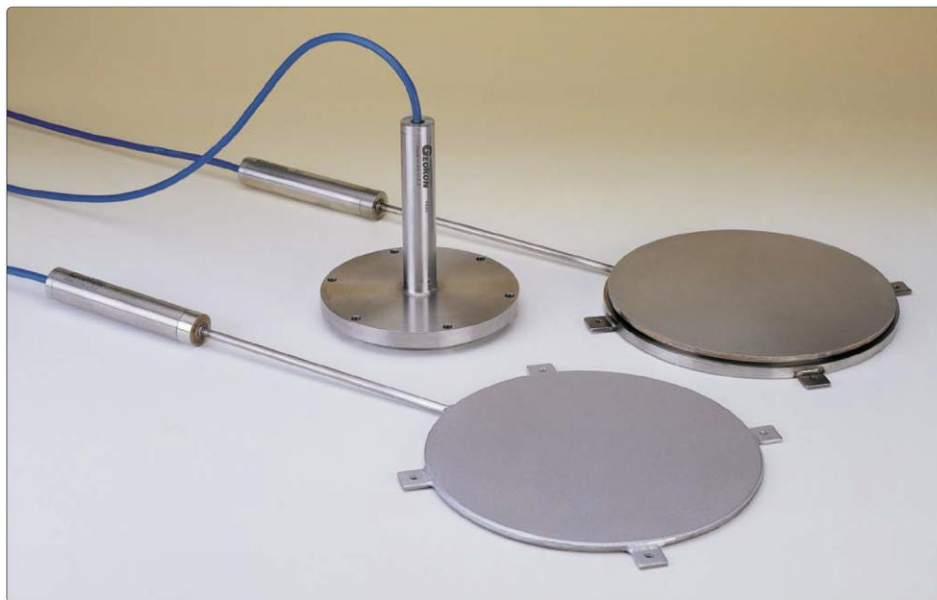
BAT-huokospainemittari on Ruotsissa kehitetty kaupallinen mittauslaite, jossa kalvon taipuma mitataan venymäliuskoilla. Mittarin pääosat ovat anturi ja suodatinpää. BAT-suodatinpää asennetaan pysyvästi maahan halutulle syvyydelle. BAT-anturi lasketaan suodatinpäähän, jonka jälkeen huokospaine voidaan mitata. Anturi sisältää myös loggerin, joten se pystyy näyttämään suoraan huokospaineen suuruuden. BAT-järjestelmää voidaan käyttää manuaalisiin mittauksiin, jolloin anturia voidaan käyttää usean suodatinpään mittaukseen. Mittaukset voidaan tehdä myös automaattisesti halutulla aikavälillä, jolloin anturi on jatkuvasti suodatinpäässä ja tällöin mittarit on mahdollista etälukea. (Brecciaroli & Kolisoja 2004.) BAT-laitteiston tarkkuus on valmistajan ohjeiden mukaan mittattaessa yleensä alle 2 kPa, joka vastaa 0,2 m syvyyttä (Savolainen & Halkola 2001).

6.4 Maanpaineen mittaus

Maanpaineen mittauksessa mitataan joko maassa vallitsevaa painetta tai maan ja rakenteen välistä painetta. Rakentamisen sektorilla kiinnostus kohdistuu tavallisesti vain jälkimmäiseen eli rakenteeseen kohdistuvaan maanpaineeseen. Maanpaineen mittauksilla selvitetään jännityksen suuruus. (Dunnicliff 1988.) Maanpaineanturi mittaa maassa vallitsevaa kokonaisjännitystä, joka sisältää maan- ja vedenpaineen. (MDT 2008.) Maamekaniikassa maanpaine käsittää maan vaakasuuntaisen jännityksen, mutta mittaustekniikassa maanpaineen määritelmä on laajempi ja käsittää myös pystysuoran maanpaineen. Maanpainetta mitataan tavallisesti kohtisuorassa tutkittavaa tasoa vastaan.

Maanpaineen mittaamiseen sisältyy epävarmuutta. Ongelmia aiheuttaa muun muassa anturin asentaminen luonnontilaiseen maahan, jolloin maa häiriintyy ja muuttaa mittausrvoja verrattuna häiriintymättömään maahan. Maatäyttöjen yhteydessä ongelma on vähäisempi. Kuitenkin maanpaineanturin kohdalle saattaa muodostua jännityskeskittyminen tai maa voi holvautua anturin ympärillä, jolloin tulokset vääristyvät. (MDT 2008.)

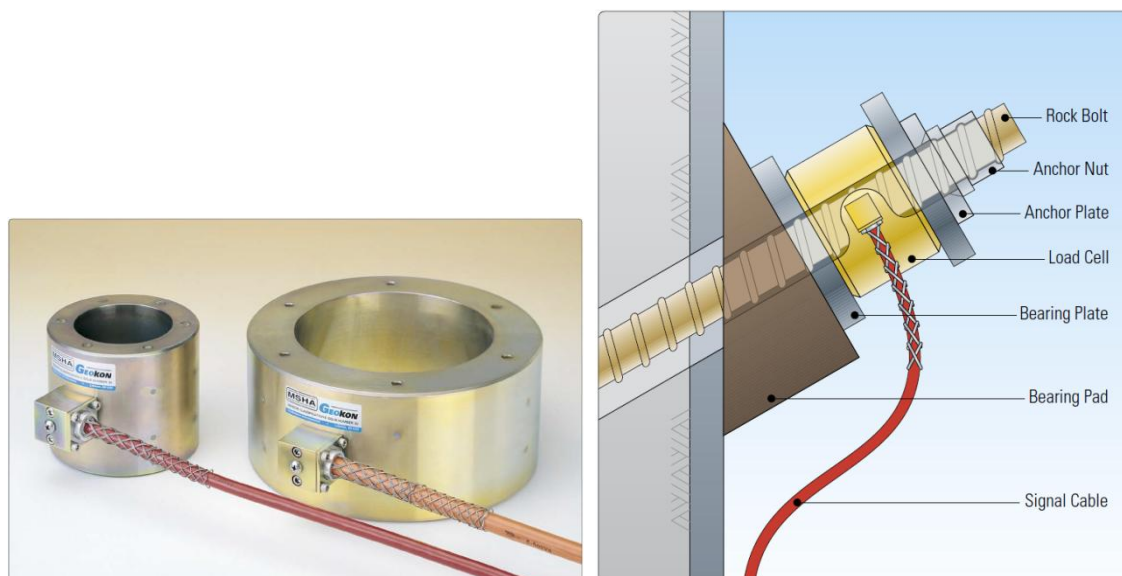
Hydraulinen maanpaineanturi koostuu kahdesta yhteen hitsatusta teräslevystä, joiden välissä on kokoonpuristumaton neste (Kuva 16). Nesteessä vaikuttava paine on tällöin yhtä suuri kuin maanpaine. Paineen suuruus mitataan paineanturista riippuen joko pneumaattisesti, värähdyslanka-anturilla tai venymäanturilla. Metallilevyjen paksuus valitaan käyttökohteen mittausolosuhteisiin sopiviksi. (Dunnicliff 1998.)



Kuva 16. Hydraulisia maanpaineantureita (Geokon 2012).

6.5 Voima-anturi

Voima-anturia (Load cell) käytetään voiman mittaamiseen ankkuritangoissa ja -vaijereissa, kalliopulteissa sekä paalujen koestuksessa (Geokon 2009). Tilapäisten kuormien lisäksi voidaan seurata ja mitata kuormia pitkäaikaisesti. Voima-anturi asennetaan mitattavaan kohteeseen siten, että kuormitus välittyy sen kautta. (Dunnicliff 1988.) Voima-anturi on tavallisesti lieriön muotoinen, keskireiällinen laite, jonka sisäessä on venymäantureita (Kuva 17). Muodonmuutos muunnetaan voimaksi laitekohtaisten kertoimien avulla. Muodonmuutos mitataan laitteesta riippuen värähdyslanka-anturilla tai sähköisellä venymäanturilla. (Geokon 2009.) Voima-anturi mittaa voimaa ainoastaan akselin suunnassa, joten niiden asento tulee varmistaa (MDT 2008). Voima-anturin tarkkuus on tyypillisesti $\pm 2 \dots \pm 10$ % mitattavasta arvosta (NDOT 2005).



Kuva 17. Voima-antureita ja havainnekuva voima-anturin sijoituksesta (Geokon 2009).

6.6 Lämpötilamittaukset

Lämpötilamittauksia tehdään yleensä kolmesta eri syystä. Ensimmäiseksi mittauksilla voidaan mitata seurata suoraan lämpötilaa, kuten tehdään roudan syvyyttä mitattaessa. Toiseksi lämpötilan muutos voi aiheuttaa muodonmuutoksia tai jännityksen muutoksia maaperässä tai rakenteessa. Kolmanneksi lämpötilaa seurataan, kun lämpötilan muutos vaikuttaa muiden mittauslaitteiden mittaustarkkuuteen. (Dunnicliff 1988.)

Lämpötilan mittaus lämpötilan vuoksi on tavallista, kun seurataan routarajan syvyyttä, maan lämpötilaa tai betonin lämpötilaa kuivumisen aikana. Lämpötilan muutos aiheuttaa useimmissa materiaaleissa muodonmuutoksia. Jos muodonmuutokset on estetty, vaikuttaa lämpötilan muutos kohteen jännitystilaan. Yksi tunnetuimmista lämpötilan aiheuttamista muutoksista on rautatiekiskojen pituuden muuttuminen. Lämpötilaherkkien mittauslaitteiden tuloksia voidaan korjata lämpötilatietojen perusteella, mikäli lämpötilan aiheuttama suhteellinen virhe on tunnettu. (Dunnicliff 1988.)

Termistori

Termistori on lämpötilaherkkä puolijohderesistori, joka lämpötilamittaus perustuu resistanssin muutokseen. Termistorista mitattu lukema saadaan luettua ohmeissa, joka muutetaan joko lukulaitteen tai muuntokertoimen avulla lämpötilaksi. Termistori voidaan valmistaa hyvin pieneksi, joten se soveltuu hyvin asennettavaksi erilaisiin mittauslaitteisiin. (Dunnicliff 1988.)

Vastuslämpötila-anturi

Vastuslämpötila-anturi perustuu metallijohtimen vastuksen muutokseen suhteessa lämpötilan muutokseen. Mitattu vastuksen arvo muutetaan lämpötilaksi. Anturi on tarkka ja

soveltuu hyvin pitkäkestoiseen käyttöön. (Dunnicliff 1988.) Lämpötilamittauksen tarkkuus anturilla on $\pm 0,5$ °C (Slope Indicator 2009b).

Värähdyslanka-lämpötilamittari

Värähdyslanka-anturiin perustuva lämpötilamittari, koostuu metallisesta ulkokuoresta. Lämpötilan muutos aiheuttaa kuoreen muodonmuutoksen, joka vaikuttaa värähdyslangan jännitykseen. Värähdyslangan taajuus muutetaan muuntokertoimien avulla lämpötilaksi. Lämpötilamittauksen tarkkuus on alle $\pm 0,5$ °C. (Slope Indicator 2009b.)

Termoparianturi

Termoparianturilla tehtävä lämpötilamittaus perustuu kahden eri metallia olevien lankojen välille muodostuvaan jännite-eroon. Lankojen toiset päät kytketään mittauspäässä yhteen ja mittaus tapahtuu lankojen toisista päistä. Lämpötilamittauksessa jännitettä ei voida suoraan muuttaa lämpötilaksi, vaan jännitettä verrataan toiseen termoparianturiin, jonka lämpötila on tunnettu. Tavallisesti vertailuanturi on rakennettu lukulaitteen sisään, jolloin lukulaite näyttää suoraan mitattavan lämpötilan. Termoparimittarin tarkkuus on noin $\pm 0,5$ °C. (Dunnicliff 1988, Onninen 2001.)

Valokuituun perustuvat lämpötila-anturit

Geokon markkinoi valokuituun perustuvaa lämpötila-anturia, jossa valokuidun toiseen päähän on liitetty mittauspää. Mittauspäässä kuidun ytimen päähän on liitetty kahtaistaittava kide, jonka taitto-ominaisuudet ovat lämpötilariippuvia. Anturit soveltuvat lämpötilamittaukseen erityisesti kohteissa, joissa mittauslaitteeseen kohdistuu voimakkaita sähköisiä häiriöitä. (Geokon 2011.)

Ramansironta-anturit (Raman scattering sensors) soveltuvat lämpötilan mittaukseen. Mittaus perustuu Rayleigh-jakautuneen valon vaimentumiseen pitkissä valokuiduissa. Kuituun johdetaan valopulssi, jonka heijastuminen mitataan. Rayleigh-aallonpituudelle on ominaista eksponentiaalinen heikkeneminen ajan suhteen. Valon nopeuden avulla valon kulkuajasta voidaan laskea heijastuman etäisyys valokuidussa. Ramansironta on lämpötilariippuvainen, jolloin heijastuvasta valosta voidaan tulkita sirontakohdan lämpötila. Ramansirontatekniikalla tutkittavan kuidun pituus voi olla enintään noin 8 km. Lämpötilan määrittäminen on mahdollista mistä tahansa kohdasta kuitua metrin tarkkuudella, lämpötilamittauksen tarkkuus on $\pm 0,2$ °C. (Glisic & Inaudi 2007.)

Lämpötilan mittaukseen soveltuvia valokuituantureita ovat myös

- Fibre Bragg Grating -valokuituanturi, katso luku 6.1.11
- Brillouinsirontaan perustuva valokuituanturi, katso luku 6.1.14.

Metyleenisini

Metyleenisinimittausta käytetään roudan syvyyden mittaamiseen. Metyleenisiniliuos on sulana sinistä ja jäätyneenä läpinäkyvää. Liuos on pääosin vettä ja se jäätyy 0 °C lämpötilassa. Metyleenisinimittari on läpinäkyvä muoviputki, jonka sisällä on metyleenisiniliuos. Mittaria varten maahan tehdään reikä, johon mittari asennetaan. Luentaa varten mittari nostetaan ylös reiästä ja mitataan roudan syvyys värinvaihdoksen kohdalta. (Onninen 2001.) Metyleenisinimittauksella saatu routarajan syvyys on virheellinen, mikäli maaperä on suolaantunut tai veden jäätymislämpötila on muuten alentunut (Duncliff 1988).

6.7 Tärinän mittaus

Tärinää aiheutuu tavallisimmin rakentamistyön yhteydessä tehtävästä räjäyttämisestä, lyöntipaalutuksesta, maan tiivistämisestä, louhimisesta ja rikotuksesta sekä maansiirrosta. Tärinän mittaaminen voi olla tarpeen, jos lähistöllä on rakennuksia tai laitteita, joita tärinä voisi vahingoittaa. Tärinä voi myös häiritä lähistön ihmisiä. (MDT 2008.)

Tärinälle sallittavat arvot riippuvat (MDT 2008)

- kohteen ja tärinälähteen välisestä etäisyydestä
- rakenteen tai rakennuksen käyttötarkoituksesta ja rakenteesta
- maaperän ominaisuuksista.

Tärinää mitataan tavallisesti laitteistolla, joka koostuu tarvittavasta määrästä geofoneja, joka on liitetty tallentimeen (NDOT 2005). Geofonit sijoitetaan tavallisesti tietyin etäisyysvälein tärinälähteestä sekä kohtiin, jotka ovat kriittisiä tärinän suhteen. Heilahdusnopeus on usein tärkein mitattava suure, mutta useimmilla laitteistoilla voidaan mitata myös kiihtyvyyttä ja taajuutta. Tarvittaessa tärinämittauksen yhteydessä voidaan mitata lisäksi paineaaltoa ja äänenpainetta. (SCDOT 2010.)

Tärinäanturit ovat tavallisesti pituudeltaan ja halkaisijaltaan noin 50 mm suuria. Yleensä mittaamisessa käytetään kahta vaakasuuntaista anturia, jotka ovat kohtisuorassa toisiinsa ja yhtä pystysuuntaista anturia. Tärinästä mitataan suurimmat arvot tai vaihtoehtoisesti mittaus voidaan suorittaa tietyin väliajoin. (MDT 2008.)

6.8 Muita mittaustapoja

6.8.1 Venymäliuska-anturi

Venymäliuska-anturilla mitataan tutkittavan kohteen muodonmuutosta, joka voi olla venymää tai puristusta (National Instruments 2012). Tyypillisiä mittaushkohteita ovat teräksen ja betonin muodonmuutokset erilaisissa rakenteissa. (Slope Indicator 2012.) Yleisimmin käytetyt venymäliuska-anturit muuntavat voimasta aiheutuvan muodon-

muutoksen sähköiseksi signaaliksi. Mittauslaitteen lukemaan vaikuttaa muodonmuutoksen lisäksi lämpötila, laitteen kiinnitys mitattavaan kohteeseen. Venymäliuskillä mitattu venymä voidaan muuttaa jännitykseksi tai voimaksi. (Omega Engineering 2012).

6.8.2 Maatutka

Maatutka (Ground Penetrating Radar GPR) on ainetta rikkomaton geofysikaalinen maan pintakerroksien tutkimusmenetelmä (Serma & Setan 2009). Maatutka lähettää korkeataajuuksista sähkömagneettista signaalia, joka heijastuu maaperässä olevista rajapinnoista, sähköisen ominaisuuksien muutospinnoilta, takaisin. Maatutkalla voidaan luoda mitattavasta rakenteesta jatkuva profiili mittauksen suunnassa. (Korkiala-Tanttu & Onninen 2001.) Maatutkalla voidaan mitata roudan syvyyttä, sillä maassa olevan veden jäätyminen muuttaa maan sähköisiä ominaisuuksia, jolloin jäätyneen ja sulan maan rajapinta on mahdollista havaita. Maan suhteellista kosteuspitoisuutta on myös mahdollista mitata maatutkalla. (Berthelot et al. 2010.)

6.8.3 Palautuvan siirtymän mittaaminen kiihtyvyysantureilla

Maan tai maarakenteen pystysuuntaista jäykkyyttä ja kantavuutta voidaan arvioida dynaamisilla kiihtyvyysantureihin perustuvilla menetelmillä. Menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi tie ja ratarakenteiden jäykkyyden mittaamiseen. Tavallisesti mittaus suoritetaan pudottamalla paino tietyltä korkeudelta ja rakenteen pinnan palautuva pystysuuntainen siirtymä mitataan geofoneilla tai kiihtyvyysantureilla. Siirtymä mitataan eri etäisyyksiltä kuormituskohdasta, jolloin mittauksen avulla voidaan laskea eri maakerrosten jäykkyydet. Esimerkiksi pudotuspainolaite toimii edellä mainitulla periaatteella. (Liikennevirasto 2013b.)

6.8.4 Muita mittausmenetelmiä lyhyesti

Paalun kantokestävyysmittaus

Paalujen koekuormituksen avulla voidaan määrittää paalun kantokestävyys. Paalujen koekuormitukseen soveltuvia menetelmiä on käsitelty esimerkiksi julkaisuissa Liikennevirasto (2011) ja RIL 254-2011 (2011).

Levykuormituskoe

Levykuormituskokeen avulla voidaan mitata maan pystysuuntainen jäykkyys ja kantavuus esimerkiksi maan tiivistyksen yhteydessä. Levykuormituskoe on kuvattu julkaisussa Liikennevirasto (2011a) ja levykuormituskokeen käyttöä tiivistystyön valvonnassa on selostettu julkaisussa InfraRYL (2010).

Troxler

Troxler-laitteistolla mitataan säteilyn avulla rakenteen tilavuuspaino ja vesipitoisuus. Mittauksella voidaan varmistaa tiivistystyön yhteydessä riittävän tiiviyn saavuttaminen. (Liikennevirasto 2011a.)

Volymetrikokeet

Volymetrikokeissa rakennekerrokseen tehdään kuoppa, josta kaivettu materiaali otetaan talteen ja kuopan tilavuus mitataan täyttämällä se vedellä (vesivolymetrikoe) tai hiekalla (hiekkavolymetrikoe). Kaivetun materiaalin painon ja kuopan tilavuuden avulla voidaan laskea materiaalin tilavuuspaino, jota verrataan materiaalista määritettyyn Proctor-tiheyteen. Tiedoista voidaan laskea materiaalin tiiviysaste ja varmistaa rakennekerroksen riittävä tiiviys. (Liikennevirasto 2011a.)

Invarteräslanka-anturi

Invarteräslanka-anturi soveltuu maan liikkeiden mittaamiseen. Mittauslaite asennetaan liikkumattomaan kohtaan ja laitteesta lähtevä invarteräslanka kiinnitetään tutkittavaan kohteeseen. Invarteräslanka on mittauslaitteessa kelalla ja mittauspisteiden etäisyyden muutos saadaan luettua mittauslaitteen kelan pyörimisestä. (Liikennevirasto 2011b.)

Raiteentarkastus radantarkastusvaunulla

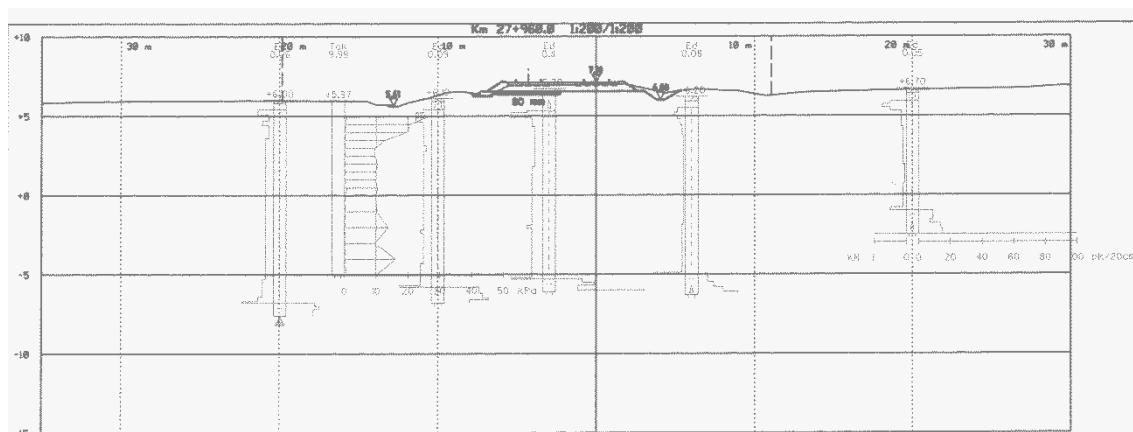
VR Track Oy:llä on käytössä radantarkastusvaunu Emma, jota käytetään raiteen asennon tarkastamiseen. Raiteentarkastuksesta perustietoa löytyy julkaisuista Ratahallintokeskus (2005) ja tarkempaa tietoa julkaisusta Liikennevirasto (2013b).

7 Monitorointikohteet

7.1 Luoman seisake

7.1.1 Kohteen esittely

Luoman koekohteessa tarkoituksena oli mitata roudan syvyyttä ja routanousua sekä painumia. Koekohteena toimi Luoman junaseisakkeen pysäköintialue. Luoma sijaitsee Helsinki–Karjaa-rataosan varressa Kirkkonummella. Pysäköintialue on rakennettu vuonna 2011 savisen peltomaan päälle. Savikerroksen paksuus tutkitulla kohdalla on 5...10 m välillä (Kuva 18) (VR Track Oy Georyhmä 2013). Pysäköintialue oli rakennettu levittämällä pohjamaan päälle murskekerros, jonka paksuus oli noin 0,56 m. Koekohte on osa Aalto-yliopiston routatutkimuksia. Tästä kohteesta käsitellään mittauksia alkuvuoden ja kesän 2012 ajalta.



Kuva 18. Ratapoikkileikkaus kohteesta, pysäköintialue radan oikealla puolella (VR Track Oy Georyhmä 2013).

7.1.2 Mittausmenetelmät

Maanpinnan korkeussuuntaisia muutoksia mitattiin painumalevyistä vaaitsemalla ja roudan syvyyttä mitattiin FinMeas Oy:n toimittamalla lämpötilaprofiilin mittauslaitteella. Tällä mittausjärjestelyllä oli tarkoitus saada mitattua pieneltä alueelta mitattua roudan syvyys sekä mahdollinen painuma ja routanousu. Mittauslaitteistot asennettiin 6.2.2012, jolloin mittaukset myös aloitettiin.

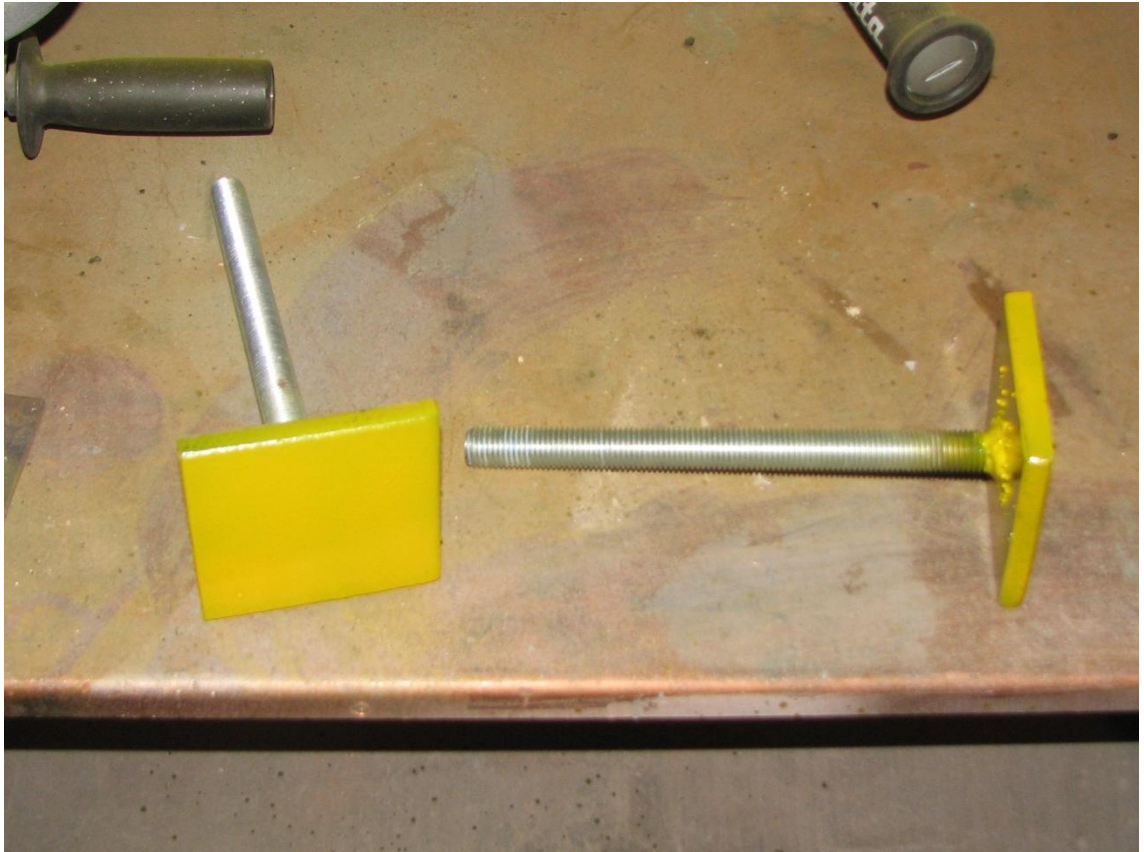
Koekohteessa käytetty lämpötilaprofiilin mittauslaite oli noin 2,6 m pitkä ja halkaisijaltaan noin 20 mm muoviputki, jonka sisään on asennettu yksittäisiä digitaalisia lämpötila-antureita (Kuva 19). Antureiden sijainti mittauslaitteessa ja mittauslaitteen syvyys maanpinnasta tunnetaan, joten yksittäisten lämpötilalukemien syvyys maanpinnasta tiedetään. Mittaustuloksista voidaankin piirtää kuvaaja eli lämpötilaprofiili, josta nähdään maan lämpötila eri syvyyksillä. Mittauslaite kytkettiin kaapelilla akkukäyttöiseen tallentimeen, josta mittaustieto lähetettiin automaattisesti FinMeasin palvelimelle. Mit-

tauksia tehtiin kaksi kertaa päivässä ja ne olivat nähtävissä reaaliaikaisesti FinMeasin verkkopalvelussa.



Kuva 19. Lämpötilaprofiilin mittauslaite.

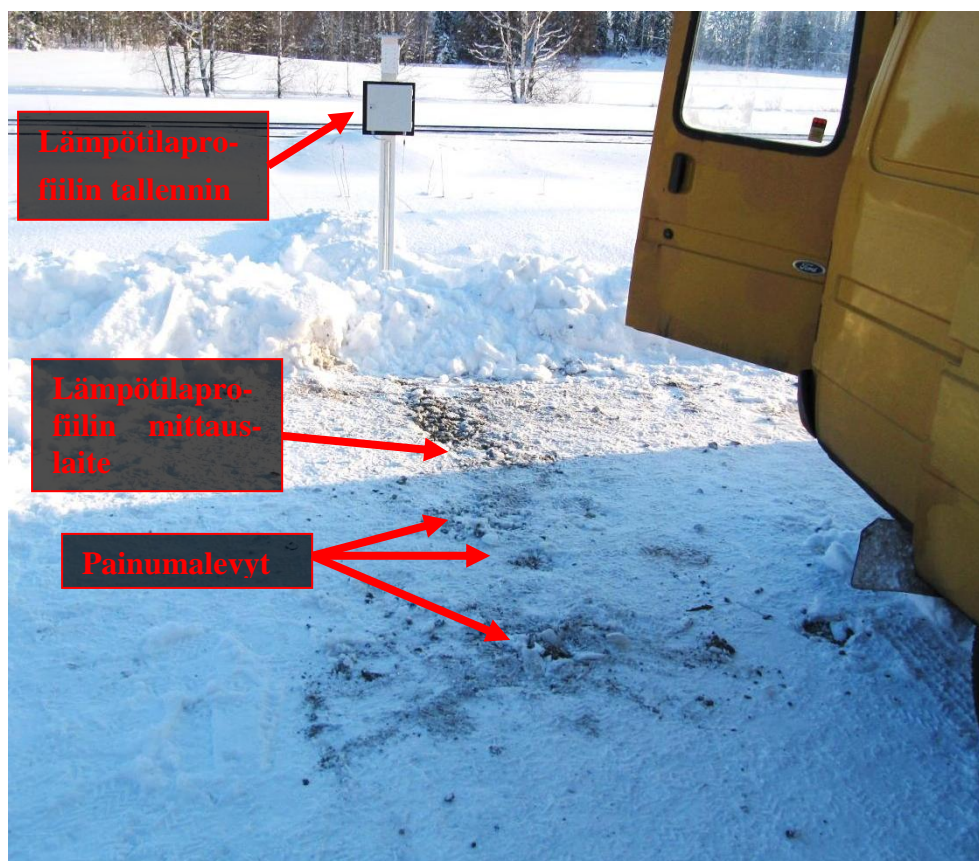
Painumalevyt olivat Aalto-yliopistossa tätä tarkoitusta varten valmistetut (Kuva 20). Painumalevyt koostuivat neliömäisestä teräslevystä, jonka toiselle puolelle oli hitsattu terästanko. Teräslevyn sivumitta oli noin 100 mm.



Kuva 20. Luoman seisakkeelle asennettuja painumalevyjä (Kuva: Gustavsson 2013).

Asennus

Lämpötilaprofiilin mittauslaite asennettiin pysäköintialueelle noin kolmen metrin päähän radan puoleisesta reunasta (Kuva 21). Painumalevyjä asennettiin kolme kappaletta siten, että ensimmäinen tuli noin metrin päähän lämpötilamittauslaiteesta pysäköintialueen reunasta poispäin. Muut kaksi asennettiin samaan suuntaan metrin välein edellisestä. Mittauslaitteiden asennusta varten kohteessa piti kaivaa kaapeleita varten ura, painumalevyjä varten tuli upottaa murskeeseen sekä lämpötilaprofiilimittausta ja painumalevyjen varsia varten tehtiin maahan reiät. Koekohteen mittausjärjestelyiden asennus tehtiin vasta helmikuun alussa, jolloin maa oli jo jäässä. Pysäköintialueen pintamateriaalina oleva murske oli myös jätynyt niin, ettei sitä pystynyt lapiolla kaivamaan ja rautakangellakin oli vaikeuksia pehmentää jätynyttä mursketta.



Kuva 21. Routamittauslaitteisto asennettuna.

Lämpötilaprofiilin mittauslaitteen muoviputkea varten tehtiin reikä poravasarella. Käytetty terä oli hieman muoviputken halkaisijaa suurempi ja 1,5 m pitkä. Tästä johtuen tehdyn reiän pituus oli selvästi lyhyempi kuin muoviputken pituus. Porattaessa havaittiin, että poranterä ulottui routaantuneiden kerrosten läpi sulaan savikerrokseen, joka tuntui myös porattaessa. Mittauslaitteen muoviputki saatiin asennettua haluttuun syvyyteen painamalla muoviputkea varovasti pehmeään saveen.

Tallennin ja tiedonsiirtolaitteisto olivat FinMeasin toimittamassa peltikaapissa, johon laitteiston akku myös mahtui. Asennusta varten kaapille oli tehty puinen tolppa, jolla kaappi saatiin asennettua reilun metrin korkeuteen. Tämä laitteisto asennettiin noin 2 m pysäköintialueen ulkopuolelle, jotta se ei häittäisi aurausta ja olisi hieman paremmassa turvassa ilkeillä. Tolppaa varten ojanpientareen multa tehtiin rautakangella reikä, johon tolppa asetettiin tukevasti pystyyn. Lämpötilaprofiilin mittauslaitteesta lähtevä kaapeli upotettiin murskeeseen pysäköintialueen reunaan asti, jonka jälkeen multa tallentimelle asti (Kuva 22). Myös kaapeliura tehtiin poravasarella talttaterää käyttäen. Pientareen multa oli lumen alta lähes sula, joten ura saatiin kaivettua lapiolla. Kaapeli suojattiin asennushiekalla ja metallikourulla, jonka jälkeen ura peitettiin. Tämän jälkeen kaapeli kytkettiin tallentimeen ja akku asennettiin paikalleen.

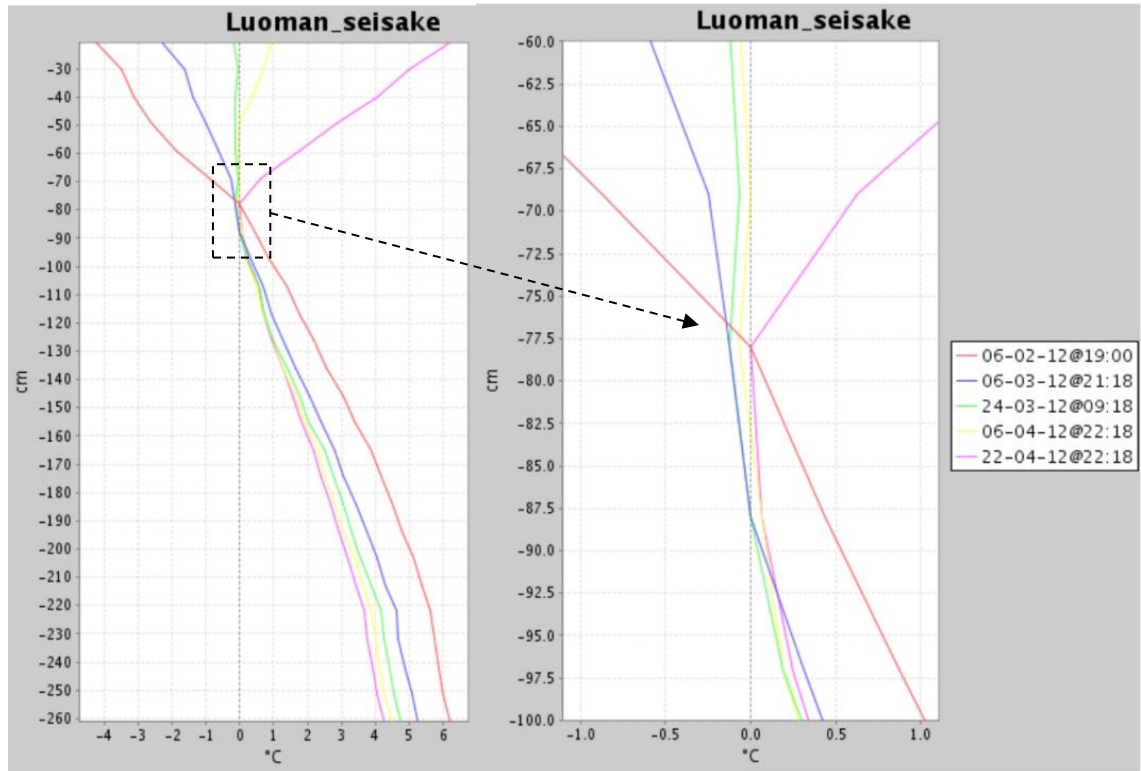


Kuva 22. Lämpötilaprofiilin mittauslaitteen kaapeleiden asennus kaapeliuraan.

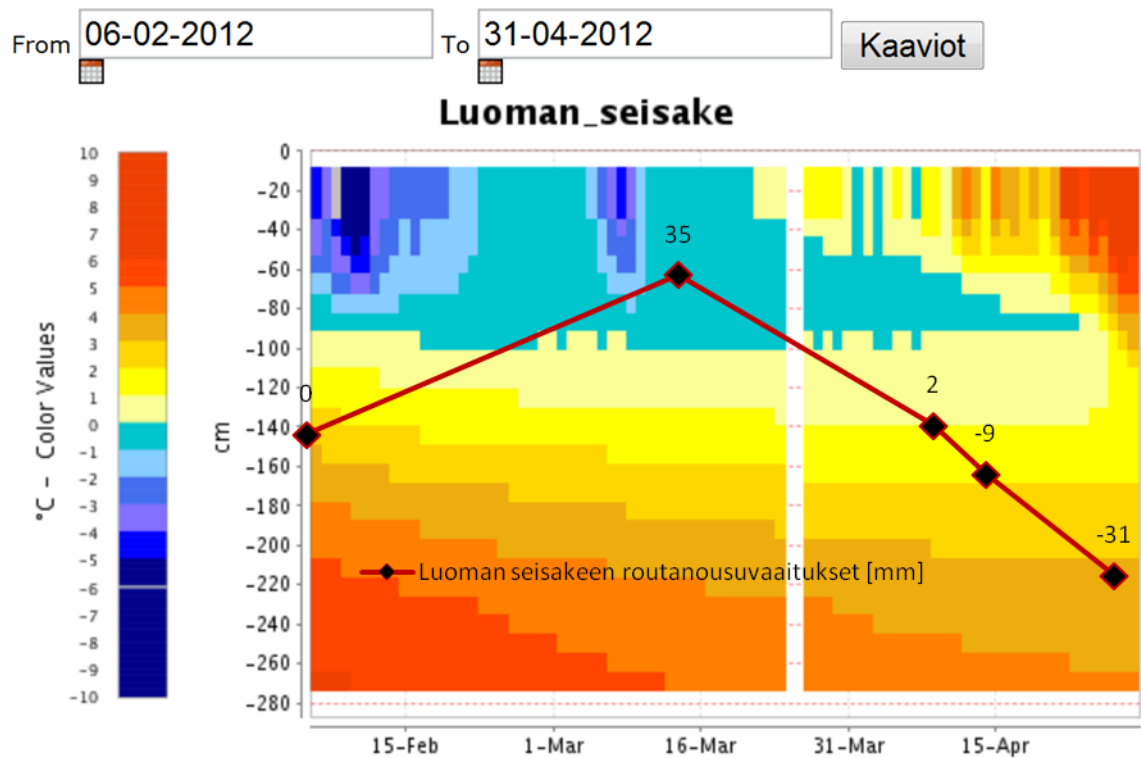
Painumalevyjä varten murskeeseen tehtiin reiät ja upotukset poravasarella. Painumalevyt asennettiin alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen tanko alaspäin, sillä murskeen käsittely todettiin ajateltua hankalammaksi. Näin päin asennettaessa tankoa varten porattiin reikä ja upotus levyä varten oli huomattavasti matalampi ja siten helpompi tehdä. Painumalevyt upotettiin parikymmentä millimetriä maanpinnan alapuolelle, jotta yliajavat autot ja auraus ei vaikuttaisi painumalevyihin. Jäisen murskeen muotoilu poravasarella oli hankalaa, mutta painumalevyt saatiin tästä huolimatta asemoitua melko tukevasti. Painumalevyjen korkeuskiintopisteeksi valittiin läheisen ratajohtopylvään 27+33 perustuksen pultti, sillä perustuksen oletettiin olevan paalutettu. Korko mitattiin vaaituskojeella.

7.1.3 Mittaustulokset

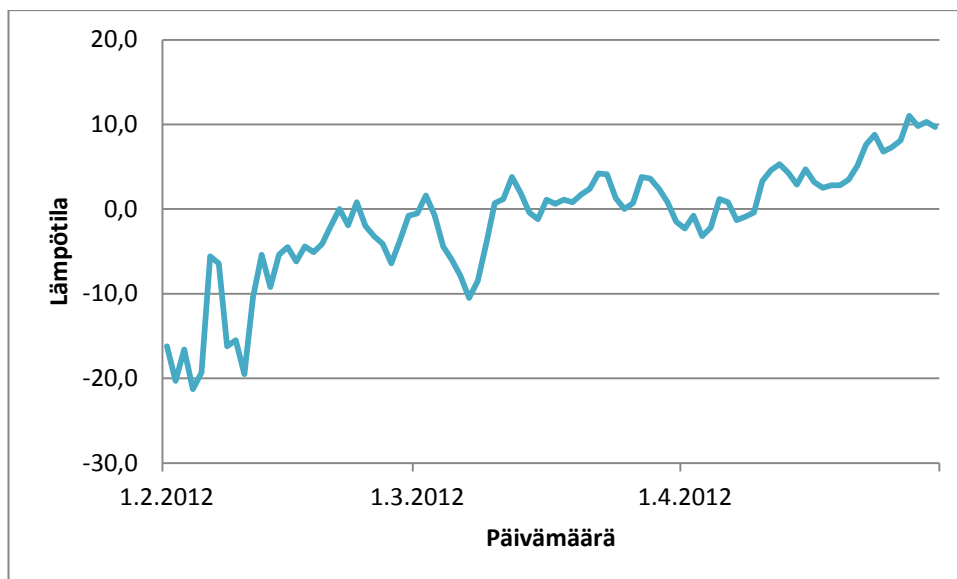
Lämpötilamittausten tallennus alkoi 6.2.2012, jolloin routaraja oli noin 78 cm syvyydessä (Kuva 23). Routaantuminen jatkui helmikuun loppupuolelle asti, jolloin routaraja ulottui 88 cm syvyyteen. Roudan syvyys pysyi mittauksen mukaan muuttumattomana 24.3.2012 asti. Mittauksen mukaan koko mitattu maakerros oli sulanut 22.4.2012. Tuloksissa nähdään selvästi pakkasjaksojen vaikutus maan lämpötilaan (Kuva 24) ja (Kuva 25).



Kuva 23. Luoman seisakkeen lämpötilaprofiili (FinMeas 2013a).



Kuva 24. Maan lämpötila ja vaaitustulokset kevään 2012 aikana (Muokattu: FinMeas 2013a).



Kuva 25. Helmi-, maalisi- ja hutikuun 2012 vuorokauden keskilämpötilat Helsinki-Vantaalla (Ilmatieteenlaitos 2012a, Ilmatieteenlaitos 2012b, Ilmatieteenlaitos 2012c).

Painumalevyjen mittaukset 12.3.2012 osoittivat, että oletettavasti routimisesta aiheutuva maan nousua olisi tapahtunut reilussa kuukaudessa noin 35 mm. Maaliskuun korkeuteen nähden kesän mittaustulokset osoittavat noin 90 mm painumaa. Kolmen painumalevyn tulokset eroavat toisistaan enimmillään noin 10 mm, mutta kaksi painumalevyä osoittivat keskenään likimain saman suuruisia korkeuden muutoksia.

7.1.4 Mittausten toimivuus ja luotettavuus

Talven aikana vuoden 2012 alussa pysäköintialueen aurauspenger jäi oletettua keskemälle ja routamittauspiste jäi auraslumien alle. Lumen eristysvaikutus on varmasti pienentänyt pakkasen vaikutusta ja mahdollisesti pienentänyt roudan syvyyttä. Lumivali siirrettiin kauemmaksi myöhemmin samana talvena, mutta sen vaikutusta tuloksiin ei voida tarkkaan arvioida. Lämpötilamittaus on keskeytynyt kaksi kertaa vuoden aikana muutaman päivän ajaksi, mutta mittaus on jatkunut tämän jälkeen taas normaalisti. Varsinaisena mittausvirheenä tätä ei voi pitää, eikä se vaikuta routamittauskohteessa tulosten hyödyllisyyteen.

Lämpötila-anturit on kalibroitu vesi-jäämurska-seoksessa FinMeasin toimesta ja antureille voidaan luvata 0,1 °C tarkkuus, kun mitataan 0 °C lämpötilaa (Ylönen 2013). Kuitenkin tulee huomata, että jo 0,1 °C virhe mittaustuloksessa voi siirtää mitattua routarajaa jopa 0,1 metriä. Toisaalta lämpötilaprofiilin mittauksesta ei voida suoraan määrittää todellista roudan syvyyttä, sillä savisen maan jäätyislämpötila voi olla alle 0 °C.

Painumalevyillä mitatut korkeusaseman muutokset johtuvat oletettavasti routanoususta ja roudan sulamisesta. Pysäköintialueen painuminen saven konsolidaation seurauksena

on myös mahdollista, mutta se ei selittäisi talven aikana tapahtunutta nousua. Painumalevyjen vaaitukseen käytetyn vaaituskojeen tarkkuuden oletettiin olevan ± 5 mm, joka on riittävä kohteessa tapahtuneiden korkeudenmuutosten havaitsemiseen. Vaaitusetäisyys kiintopisteen ja painumalevyjen välillä on lisäksi verrattain lyhyt, noin 20–30 m. Ratajohtopylvään perustamistapaa selvitettiin VR Track Oy:stä, mutta varmuutta pylvään perustamistavasta ei saatu. Johtopäätös oli, että oletettavasti pylvästä ei ole perustettu paaluille vaan maanvaraisena. On siis mahdollista, että ratajohtopylvään perustus ei pysy aivan vakiokorkeudella, joka aiheuttaisi virhettä mittauksiksi. Tuloksista havaitaan kuitenkin, että pysäköintialueen korkeus vaihtelee merkittävästi enemmän kuin ratajohtopylvään korkeus. Oletettavasti ratajohtopylvään korkeusvaihtelu on vähäistä, sillä pylvään perustus on routaeristetty (VR Track Oy Georyhmä 2013).

Painumalevyjen asettumisen aiheuttamia muutoksia ei näillä mittauksilla voida havaita, mutta yhden painumalevyn korkeusasemassa tapahtui suurempi muutos sulamiskauden aikana. Tämä voi johtua esimerkiksi talvella tehdyn upotuksen muotoutumisesta. Liikenne on pysäköintialueella vähäistä ja pääosin henkilöautoliikennettä.

7.1.5 Tavoitteiden toteutuminen

Painumalevymittauksista voidaan havaita oletusten mukaisia muutoksia. Painumalevyt osoittivat keskenään vertailukelpoisia muutoksia, jolloin voidaan olettaa että painumalevyt ovat toimineet toivotusti. Samalla voidaan päätellä, että levyt ovat ilmeisesti pysyneet suojassa ulkoisilta tekijöiltä, kuten auraukselta. Vaaituksen kiintopisteen valinnassa olisi pitänyt varmistua, että kiintopisteen korkeus pysyy varmasti muuttumattomana. Korkeudenmuutosten suuruusluokkaa ei arvioitu tämän työn puitteissa, joten roudan aiheuttamien muutosten suuruusluokkaan ei voida ottaa kantaa. Lämpötilaprofiilin mitaus toimi laitteistonsa puolesta lähes virheettömästi, mutta aurauksvallin vaikutusta roudan tunkeutumisyyvyyteen ei voi arvioida. Routa olisi voinut päästä hieman syvemmälle, mikäli lumi olisi aurattu kauemmaksi.

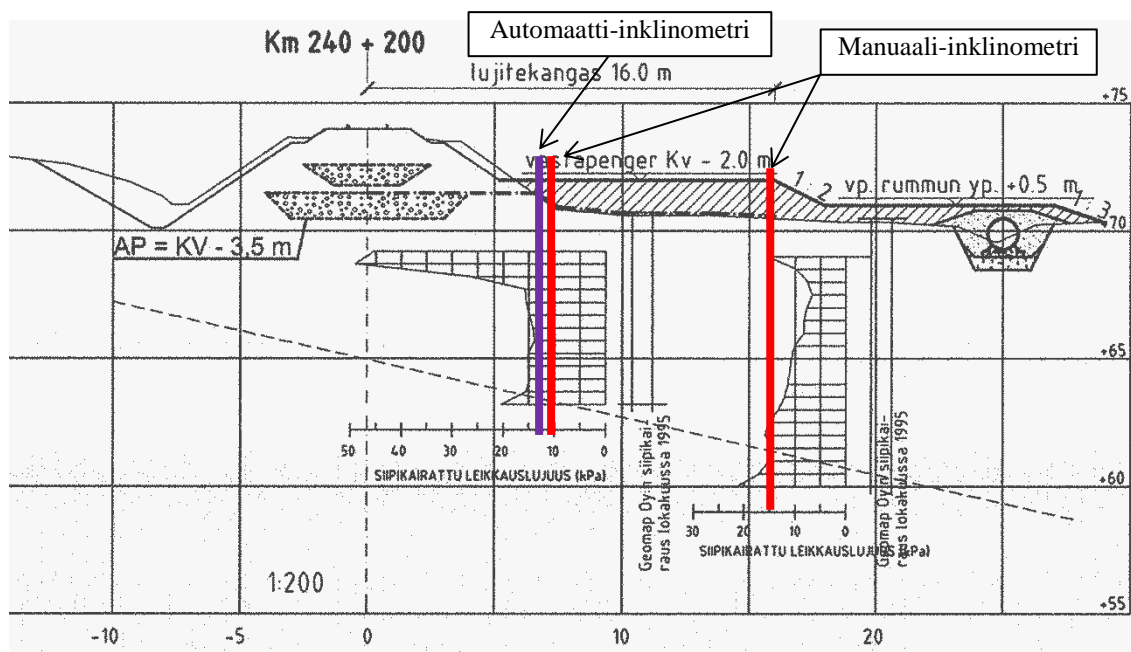
7.2 Mäenkylän -ratapehmeikkö

7.2.1 Kohteen esittely

Mäenkylän pehmeikkö sijaitsee Lielahti-Kokemäki-rataosalla, Tampereelta noin 40 km länteen päin. Mäenkylä valittiin esimerkkikohteeksi, koska sen stabiliteetin on todettu olevan heikko ja tästä syystä kohdetta on tutkittu laajasti. Lisäksi Mäenkylä kuuluu Lielahti-Kokemäki perusparannushankkeeseen. Mäenkylän pehmeikkö alkaa ratakilometritä 240+000 ja loppuu 240+360, joten käsiteltävän pehmeikön pituus on 360 metriä. Mäenkylässä on tapahtunut ratapenkereen sortuma vuonna 1965 korkeusviivan noston yhteydessä. Vuonna 1999 oikean puolen vastapenger sortui työn aikana, mutta penkereessä ei kuitenkaan havaittu tällöin liikettä. Penkereen kevennys tehtiin vuonna 2000 välillä 240+040...240+340, jossa kevennys on ulotettu 3,5 m syvyyteen radan korkeus-

viivaan nähden. Kevennys on toteutettu kahdessa kerroksessa, joista alemman paksuus on 1000 mm ja ylemmän 800 mm. Kevennyskerrosten väliin on laitettu 300 mm paksu sorakerros. Ylemmän kevennyskerroksen päälle on laitettu alhaalta lukien 550 mm paksu eristyskerros, 300 mm paksu välikerros ja 550 mm paksu raidesepelikerros. Kevennys on viimeisin pehmeiköllä tehty laajempi korjaustoimenpide. (VR Track Oy Georyhmä 2013.)

Mäenkylässä ratapenger on rakennettu pääasiassa saven päälle. Välillä 240+000...240+100 savikerroksen paksuus on 2–10 m ja savikerroksen paksuus on likimain sama radan poikkisuunnassa. Paksuimpien savikerrosten päällä on vielä 0–2 m paksu turvekerros. Välillä 240+100...240+220 pohjaolosuhteet muuttuvat radan poikkisuunnassa siten, että savikerroksen paksuus on suurempi penkereen oikealla puolella, kun katsotaan kasvavan kilometrilukeman suuntaan (Kuva 26). Penkereen vasemmalla puolella on 1–2 m paksu kuivakuorikerros, joka loppuu penkereen toiselle puolelle siirtyessä. Oikealla puolella maan pinnassa on turvekerros, joka paksunee oikealle mennessä. Kuivakuoren ja turpeen alla on savikerros, jonka paksuus penkereen vasemmalla puolella on 1–4 m ja oikealla puolella 3–8 m. Välillä 240+220...240+360 savikerroksen paksuus pienenee siten, että penkereen vasemmalla puolella saven paksuus on 1–2 m ja oikealla puolella noin 5 m. (VR Track Oy Georyhmä 2013.)



Kuva 26. Ratapoikkileikkaus Mäenkylässä pehmeiköllä (VR Track Oy Georyhmä 2013).

Monitoroinnin ensisijaisena tavoitteena on varmistaa radan riittävä stabiilitteetti. Mäenkylässä on käytetty inklinometrimittauksia penkereen liikkeiden monitorointiin. Radan historian tuntien vahvistustoimenpiteiden tarpeellisuutta on kuitenkin mietitty, jolloin radan stabiilitteetti saataisiin varmistettua.

7.2.2 Mittausmenetelmät ja -tulokset

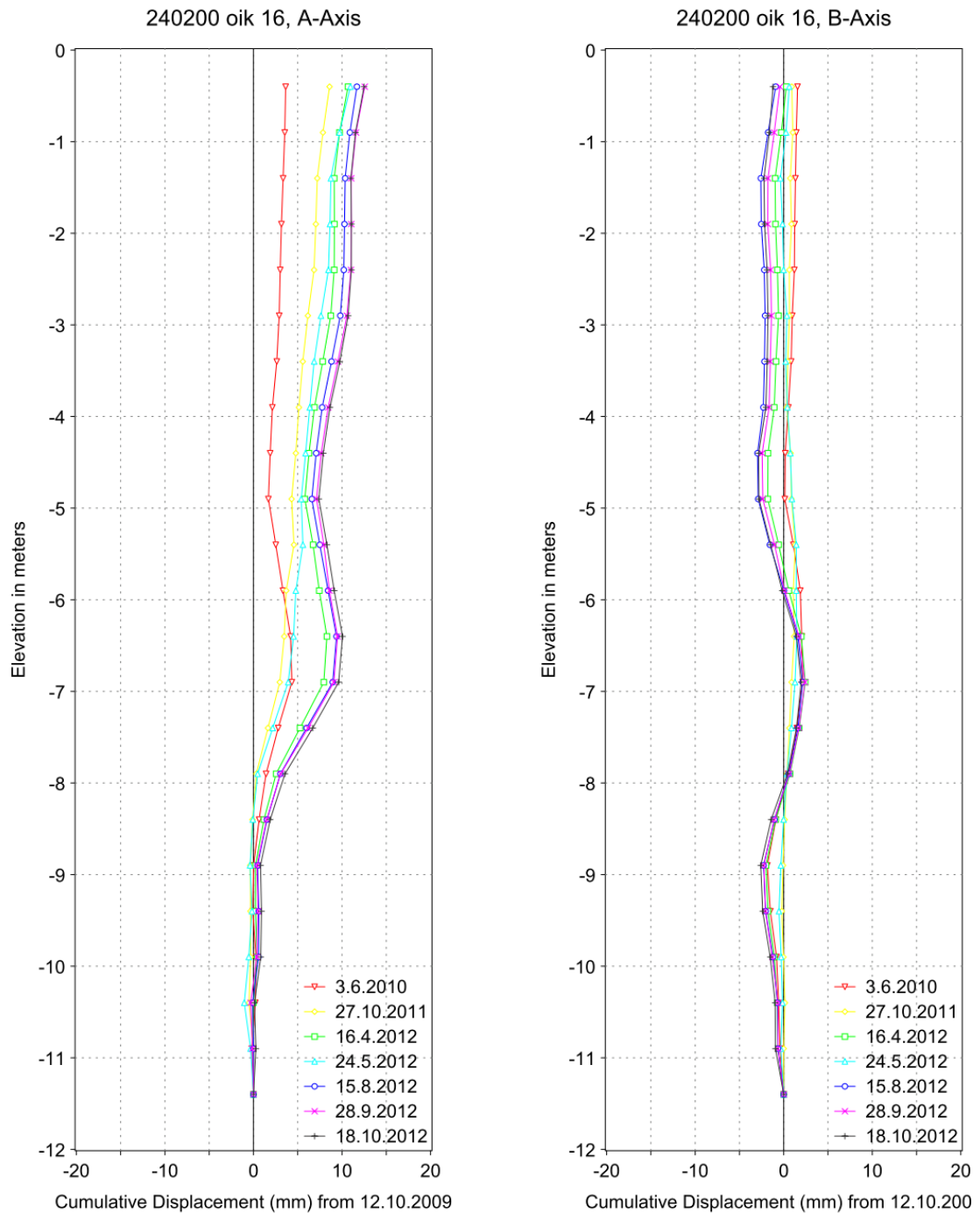
Mäenkylässä siirtymien monitorointiin on käytetty inklinometrejä ja kiskon vaaituksia. Kohteessa on käytetty sekä manuaali- ja automaatti-inklinometrejä samanaikaisesti. Lisäksi kohteesta on tehty maaliskuussa 2009 maatutkamittaus (Silvast 2012).

Manuaali-inklinometrejä on asennettu Mäenkylän pehmeikölle useita, joista 5 kappaletta on edelleen käytössä (Taulukko 4). Nykyiset inklinometrit sijaitsevat ratakilometreillä 240+060, 240+145, 240+200 ja 240+202. Kohdassa 240+060 on inklinometri molemmiin puolin ratapengertä. Käytetty manuaali-inklinometri on Slope Indicatorin valmistama. Automaatti-inklinometrejä on käytössä kaksi kappaletta kilometreillä 240+060 ja 240+200. Mittauksissa käytetään FinMeas Oy:n toimittamia automaatti-inklinometrejä.

Taulukko 4. Mäenkylän inklinometrien sijainti.

Inklinometri	Suunta ja sivuetaisyys	Tyyppi	Mittausten aloitusvuosi
240+060	oik. 14	man.	2009
240+060	vas. 7	man.	2012
240+145	oik. 7,5	man.	2012
240+200	oik. 16	man.	2009
240+202	oik. 7	man.	2012
240+060	oik. 6,5	aut.	2011
240+200	oik. 6,5	aut.	2011

Mäenkylässä on aloitettu järjestelmällinen manuaali-inklinometrimittaus vuonna 2009 ratakilometreillä 240+060 ja 240+200. Inklinometrit sijaitsevat radan keskilinjasta oikealle noin 15 m, joka on vuonna 1999 rakennetun vastapenkereen kohdalla. Kohdassa 240+060 keskilinjasta oikealle 14 m mitatut siirtymät ovat putken yläpäästä noin 10 mm kolmen vuoden aikana. Siirtymänopeus on hidastunut mittausjakson aikana, mutta inklinometriputkea on edelleen mitattu. Inklinometrillä mitattujen siirtymien muoto näyttäisi, että siirtymät ovat painumasta aiheutuvia. Kohdassa 240+200 keskilinjasta oikealle 16 m mittaustuloksista näkyy painuman lisäksi liukupinnan muodostumisesta johtuvaa siirtymää (Kuva 27). Siirtymien suuruus on putken yläpäästä mitattuna 13 mm ja 6,5 m syvyydessä 10 mm kolmen vuoden aikana. Samoin kuin toisessa samaan aikaan asennetussa inklinometriputkessa, liike näyttää hieman hidastuneen kahden vuoden jälkeen, mutta inklinometrimittauksessa nähdään edelleen tapahtuvan siirtymää.



Kuva 27. Mäenkylän 240+200 oik. 16 m inklinometrimittaustuloste (VR Track Oy Geor ryhmä).

Uudemmat manuaali-inklinometrit on asennettu vuonna 2012. Tällöin inklinometrit on asennettu lähemmäksi rataa. Kilometrillä 240+060 inklinometri on asennettu huhtikuussa 2012 radan vasemmalle puolelle 7 metriä keskilinjasta. Mittaus osoittaa maassa tapahtuneen liikettä, noin 5 mm puolessa vuodessa putken yläpäästä mitattuna. Inklinometriputki on siirtynyt 3 m syvyydessä 3 mm puolessa vuodessa. Siirtymän muodon perusteella mitattu siirtymä aiheutuu ratapenkereen painumasta. Kilometrillä 240+145 sijaitsevan inklinometrin tulosten perusteella siirtymää ei ole tapahtunut. Kilometrillä

240+202 radan keskilinjasta 7 metriä oikealle asennetussa putkessa on todettu olevan asettumisesta aiheutunutta siirtymää, jonka on havaittu asettuneen vasta elokuussa, joka on valittu 0-mittaukseksi. Asentamisen yhteydessä inklinometriputkea varten tehty reikä oli vaikea saada pysymään auki, jonka takia reikää jouduttiin puhdistamaan tavallista enemmän. Siirtymä radan poikkisuuntaan on alle 1 mm kahdessa kuukaudessa.

Inklinometriputket automaatti-inklinometrejä varten on asennettu 1.2.2011 ja mittaus on aloitettu kohdissa 240+060 ja 240+200 6.2.2011. Kohdan 240+060 mittauslaitteisto vaihdettiin uuteen 6.8.2012, jonka jälkeen monitorointia jatkettiin uudella laitteistolla. Toinen automaatti-inklinometrin mittaustuloksissa havaittiin vuoden 2012 loppupuolella 5–10 mm hajontaa mittauksesta toiseen, jonka vuoksi inklinometrilaitteisto vaihdettiin uuteen 8.2.2013. Inklinometrien mittaustaajuus on ollut kaksi mittausta päivässä. Siirtymät ovat olleet alle 5 mm tarkastellulla ajanjaksolla.

Painumamittaus vaaitsemalla on aloitettu huhtikuussa 2012. Mittauksessa seurataan oikean ja vasemman kiskon selän korkeutta, josta tulokseksi saadaan kummankin kiskon korkeuden muutos (Liite 2). Mittaustarkkuudeksi on ilmoitettu ± 2 mm, joka on riittävä kiskon korkeuden muutosten havaitsemiseen. Painumamittaus osoittaa kiskon liikuneen alaspäin koko tarkastelualueella. Muutokset ovat pääosin 2–6 mm välillä. Pienin yksittäinen arvo oli 0,8 mm ja suurin arvo 7 mm. Tuloksista nähdään, että oikean puoleinen kisko on painunut saman verran tai enemmän kuin vasemman puoleinen kisko lähes koko matkalla. Merkittävin poikkeus tähän on 240+270, jossa vasen kisko on ollut yhtä mittausta lukuun ottamatta 1 mm oikeata kiskoa alempana.

Painumamittaustuloksista nähdään, että kiskon korkeus on muutamissa mittauspisteissä noussut yhden millimetrin verran peräkkäisten mittausten välillä. Kiskon korkeus ei kuitenkaan ole noussut 0-mittausta ylempään tasoon yhdessäkään mittauspisteessä. Kiskon korkeus on muuttunut 4 mm tai enemmän tarkkailujakson aikana väleillä 240+050...240+130 ja 240+170...240+290 sekä kohdassa 240+330. Suurimmat muutokset viimeisen mittauksen mukaan ovat tapahtuneet 240+090...240+110 ja 240+210...240+230 sekä 240+290.

Mäenkylässä on suoritettu maatutkaluotaus maaliskuussa 2009 (Liite 3) ja laserkeilaus kesäkuussa 2010 RoadScannersin toimesta. Maatutkaluotaus on suoritettu liikkuvasta junasta radan keskeltä. Mäenkylässä tehty maatutkamittaus kuuluu Lielähti–Kokemäki perusparannusvaiheen lähtötietojen hankintaa. Mittauksissa maakerrosten tulkinta on ulottunut enimmillään noin 2 m syvyydelle. Maatutkakuvaajista tulkitaan maakerrosten kerrosrajat ja muut rajapinnat. Tulkinta perustuu tulkitsijan näkemykseen ja saatavilla olevaan tausta-aineistoon. Mäenkyllän kohdalla kerrosrajojen tulkinnassa on käytetty apuna koekuoppatutkimuksia, joista on saatu määritettyä pistemäisesti noin 100 m vä-

lein todelliset maakerrosrajat. Koekuoppatutkimus tehdään penkereen sivusta kaivinkoneella kaivamalla noin 1,3 m syvyydelle.

Maatutkaluotauksessa näkyy tuentakerroksen paksuusvaihteluja, joita voidaan pitää merkinä penkereen painumasta. Tämä aiheutuu ratapölkkyjen kiilauksesta, jossa kiskot asetetaan oikeaan korkoon. Painuneisiin kohtiin lisätään sepeliä, joka havaitaan paksumpana tuentasepelikerroksena.

Maatutkaluotauksessa nähdään päällysrakenteen alaraja, joka on pienimmillään 0,42 m syvyydessä ja suurimmillaan noin 0,9 m syvyydessä. Suurin päällysrakennepaksuus on mitattu kohdasta 240+000...240+010, mutta kohdalla ei ole tehty ratapenkereen kevennystä. Päällysrakenteen paksuus pienenee kohdalta 240+010 eteenpäin 240+115 asti paksuuden muuttuessa tällä välillä 0,9 metristä 0,43 metriin. Kohdasta 240+115 Päällysrakenteen paksuus pysyy likimain samana paksuuden ollessa 0,43 metrin ja 0,56 metrin välillä. Tällä välillä raidesepelin paksuuden on tulkittu olevan alle 0,55 m lähes koko välillä. Seuraava maatutkasta tulkittu kerrosraja on ylemmän kevennyskerroksen alaraja, jonka tulisi olla kevennetyllä osalla 1,4 m syvyydellä. Maatutkasta tulkittu kerrosraja on alun keventämättömällä alueella 1,45–1,95 m syvyydellä. Kevennetyllä alueella kerrosraja kulkee 1,45–1,75 m syvyydellä.

Maatutkan perusteella painumaa voi tulkita, kun molemmat kerrosrajat ovat samalta kohdalta alempana, kuin viereisten kohtien taso. Tällä perusteella painumaa voidaan tulkita tapahtuneen välillä 240+130...240+150. Muita selviä painumakohtia maatutkan tuloksista ei voida havaita, vaikka kerrosrajoissa onkin selvää korkeusvaihtelua. Etenkin alemman kerrosrajan eli kevytsorakevennyksen yläpinnassa on yli 0,3 m syvyysvaihtelua ja melko nopeita syvyysmuutoksia. Näitä muutoksia ei kuitenkaan voi havaita päällysrakenteen kerrosrajan muodoista.

7.2.3 Mittausten toimivuus ja luotettavuus

Manuaali-inklinometrien tulokset ovat olleet pääosin johdonmukaisia ja siirtymät ovat tapahtuneet oletettuihin suuntiin. Mittaukset on suoritettu jokaisessa pisteessä ja jokaisella mittauskerralla samalla mittauslaitteistolla. Ainoa selvä epäjohdonmukaisuus on nähtävissä kohdan 240+200 tuloksissa, jossa 27.10.2011 ja 24.5.2012 tehdyt mittaukset poikkeavat erityisesti 6–8 m syvyydessä muista mittauskerroista. Viimeisimmät kolme mittausta ovat kuitenkin muodoltaan keskenään samankaltaisia, joten viimeisimpiä mitaustuloksia voidaan pitää luotettavina. Toisaalta vuonna 2012 asennetuista inklinometriputkista on tehty vasta kaksi mittausta, joten mittauksen luotettavuudesta on mahdollista päästä varmuuteen.

Automaatti-inklinometrit eivät ole toimineen odotetulla tavalla, mutta ongelmat on saatu korjattua. Tuloksissa on ollut suuriakin (5–10 mm) siirtymiä peräkkäisten mittausten välillä. Kilometrin 240+060 mittausanturit päätettiin vaihtaa, koska saatujen mittaustuloksien perusteella mittaukset tulkittiin virheellisiksi. Anturit vaihdettiin 6.8.2012 eli puolitoista vuotta mittauksen aloittamisen jälkeen. Tämän jälkeen mitatut siirtymät ovat huomattavasti pienempiä eikä yksittäisissä mittauksissa ole tapahtunut huomattavia muutoksia. Mitattujen siirtymien suunta ja suuruus ovat myös yhdenmukaisia manuaali-inklinometriin nähden, joten uusien anturien voidaan olettaa toimivan oikein.

Toisessa automaatti-inklinometrissä kilometrillä 240+200 oli myös ongelmia ennen sen uusimista. Mittauksen aloittamisen jälkeen siirtymiä alkoi mittauksen mukaan tapahtua etenkin radan pituussuunnassa. Kuukauden jälkeen siirtymän suuruus oli noin 5 mm ja kahden kuukauden jälkeen noin 10 mm. Radan poikkisuuntaiset siirtymät olivat mittauksen mukaan tällöin vielä alle 3 mm. Kahden kuukauden jälkeen siirtymät eivät enää juurikaan muuttuneet, josta voidaan päätellä, että inklinometriputki asettui vasta kaksi kuukautta asennuksen ja mittauksen aloittamisen jälkeen. Tämän jälkeen mittaus jatkui keskeytymättömänä 20.10.2011 asti, jonka jälkeen tallentui vielä muutamia mittauksia, joista viimeisin 3.11.2011. Suurin mitattu siirtymä välillä 6.4.2011–3.11.2011 oli putken yläpäästä noin 7 mm radasta poispäin. Mittaus saatiin uudelleen käyntiin 26.4.2012, mutta mitatut siirtymät saattoivat olla yli 10 mm vuorokaudessa. Lisäksi mittausten mukaan siirtymän suunta saattoi vaihdella päivittäin. Näillä perusteilla huhtikuun 2012 jälkeisiä mittauksia voidaan pitää virheellisinä. Mittauslaitteiston ohjauselektroniikka vaihdettiin 25.11.2012, mutta se ei poistanut mittausten hajontaa.

Virheellisten mittausten syyksi osoittautui mittausantureiden valmistusvirhe. Syyn selvittämisen jälkeen FinMeas Oy vaihtoi antureiden valmistajaa ja samalla laitteiston testiohjelman tiukennettiin. Myös mittausohjelmistoa päivitettiin, jotta tulosten hajontaa saataisiin vähennettyä. (FinMeas 2013b.) Inklinometrilaitteisto uusittiin 8.2.2013 kohtaan 240+200, jonka jälkeen mitattujen siirtymien suuruus on ollut huomattavasti pienempää, joten mittausten hajonta on ainakin vähentynyt. Mittauslaitteiston todellista toimintaa siirtymien mittauksessa ei voida vielä arvioida, sillä mittausaika on vielä lyhyt ja tuloksia tulisi verrata myös viereisiin manuaali-inklinometreihin.

Painumamittaus on toiminut oletetusti ja mitatut siirtymät ovat olleet ennako-odotusten suuntaisia. Mitatut painumat ovat suurempia, kuin mittaustavan tarkkuus, joten todellisia muutoksia tarkkailuaikana on tapahtunut. Mittaustavasta johtuen pohjamaan painumasta aiheutuvaa muutosta ei voida määrittää tarkasti. Osa muutoksesta aiheutuu kuitenkin sepelin jauhautumisesta ratapölkkyjen alla ja vain osa pohjamaan painumisesta. Pohjamaan painumisen osuutta kiskon korkeuden muutokseen ei voida tarkasti tietää, mutta suuruusluokka voidaan päätellä tarkastelemalla monitorointialueen pienimpiä ja

suurimpia kiskon korkeuden muutoksia. Sepelin jauhautumisesta johtuvan painuman voidaan olettaa olevan likimain samansuuruista koko tarkasteltavalla osuudella. Mittauksen enimmäiskesto määräytyy raiteen tuennan ajankohdan perusteella. Viimeiseksi mittauskerraksi jäi 4.10.2012, sillä raide tuettiin tämän jälkeen, eikä korkeusasema olisi tämän jälkeen enää vertailukelpoinen.

Maatutkaluotauksen tavoitteena oli antaa tietoa tapahtuneista painumista. Maakerrosten rajojen määrittämisessä apuna oli käytetty maatutka-aineiston lisäksi koekuoppatutkimuksia. Tästä johtuen maakerrosten rajojen voidaan olettaa vastaavan hyvin todellisia kerrosrajoja. Maatutka-aineistosta ei ole tulkittu pohjamaan yläpinnan sijaintia, koska tutkimuksessa on selvitetty vain routarajan yläpuoleisia maakerroksia.

7.2.4 Tavoitteiden toteutuminen

Kohteessa on havaittu hidasta sivusiirtymää ja siirtymien nopeus ei ole ainakaan kasvanut tarkasteltuna ajanjaksona. Sivusiirtymien suuruuksia ja suuntia voidaan verrata eri mittauslaitteiden kesken ja näin on saatu arvioitua todelliset muutokset sekä mahdolliset virheelliset sivusiirtymämittaukset. Kiskon korkeuden mittaustulokset osoittavat, että kisko painuu, mutta muutokset ovat olleet pieniä. Ratapenkereen on todettu olevan liikkeessä, mutta sivusiirtymät ovat olleet hitaita. Vahvistustoimenpiteiden tarvetta harkitaan vielä, mutta tämänhetkisen arvion mukaan ratapengertä ei tarvitse vahvistaa.

7.3 Valtatien 7 parantaminen Koskenkylä–Kotka

7.3.1 Kohteen esittely

Kohde liittyy valtatie 7 (E18) parantamiseen moottoritieksi välillä Koskenkylä–Kotka (Liikennevirasto 2013a). Tässä työssä käsiteltävät kohteet ovat Siltakylänjoki sekä Leppäsaari ja Kymijoen Langinkoskenhaaran itäranta. Molemmissa kohteissa on tehty paalulaattarakenteita sillan tulopenkereiden yhteyteen. Siltakylänjoen kohteessa on rakennettu kokonaan uusi tie ja Kymijoella on levennetty olemassa olevaa tietä. Maaperä Siltakylänjoen kohteissa on savea ja liejuista savea sekä Kymijoen kohteessa savista tai liejuista silttiä ja mahdollisesti savea. (Destia 2013.)

Monitoroinnin tavoitteena on ollut varmistaa jokipenkereiden riittävä stabiliteetti paalutusten yhteydessä. Paalutuksessa käytettiin TB300c tyyppisiä paaluja. Liikennevirasto oli edellyttänyt huokospaineen mittauksia Siltakylänjoen ranta-alueilla sekä Leppäsaarella ja Langinkoskenhaaran itärannalla huokospaineen ja siirtymien monitorointia. Mittausjärjestelmien tuli olla etäluettavia ja tulosten tuli olla nähtävillä reaaliaikaisesti verkkopalvelussa. (Destia 2013.)

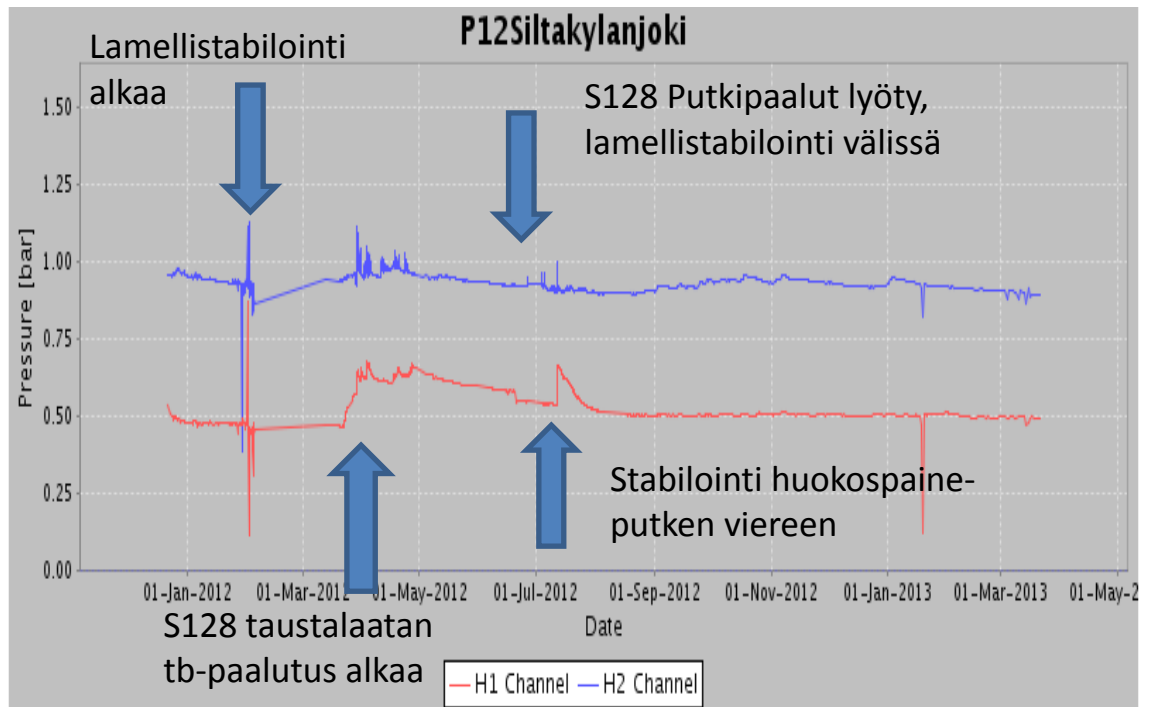
7.3.2 Mittausmenetelmät ja -tulokset

Siltakylänjoella on käytetty tarkkailumittauksissa huokosvedenpaineen mittareita ja siirtymäpultteja. Kymijoella on myös mitattu huokosvedenpainetta, mutta siirtymämittauksiin on käytetty inklinometrejä. (Destia 2013.) Tässä työssä käsitellään vain huokosvedenpaineen mittauksia ja inklinometrejä. Molemmat mittausjärjestelmät ovat FinMeas Oy:n toimittamia ja automaattisella mittauksella ja tiedonsiirrolla varustettuja.

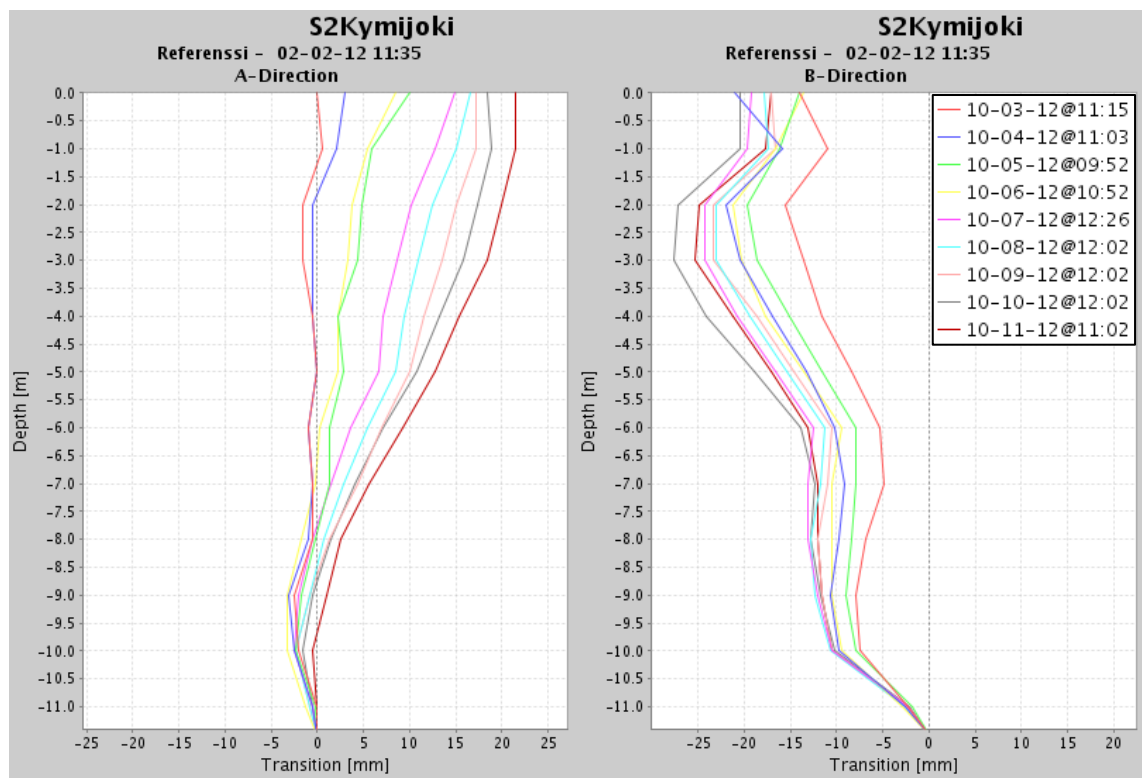
Siltakylän kohteessa huokospainemittareita on sijoitettu joen lähellä oleviin paalutus-alueisiin siten, että mittaus suoritetaan kohdasta, joka on lähimpänä jokipengertä. Kuudesta joen lähellä olevasta paalulaatta-alueesta on huokospainetta mitattu neljässä. Jokaisesta pisteestä on mitattu huokospaine kahdelta syvyydeltä, savikerroksen puoliväliltä ja alaosasta. Kymijoen kohteessa huokospainetta on mitattu rakennettavan tieosan vierestä. Molemmiin puolin jokea paalulaatta-alueen kulmassa on mitattu huokospainetta. Toiset huokospainemittauspisteet on sijoitettu noin 30 metriä kauemmas joesta paalulaatta-alueen viereen. Huokospaineanturit on asennettu syvyysuunnassa pehmeän kerroksen puoliväliin noin 5 m syvyyteen. (Destia 2013.) Huokospaineen kasvun hälytysrajaksi oli määritetty 0,3 bar (TYL Pulteri 2013). Inklinometrit on asennettu jokea lähempänä olevien huokospainemittareiden viereen, yksi joen kummallekin puolelle (Destia 2013).

Siltakylässä huokospaineen alkuarvot ovat olleet tasaisesti asennussyvyyden mukaan noin 0,1 bar metriä kohden. Huokospaineen arvot kasvoivat työn aikana 0,1–0,4 bar ja tarkkailuajan lopulla huokospaineet olivat noin 0–0,2 bar alkuarvoa korkeammat (Kuva 28). Kymijoella huokospaineen suuruus mittauksen alkaessa vaihteli 0,34–0,55 bar välillä siten, että syvemmälle asennetut mittarit osoittavat suurempaa arvoa. Huokospaineen arvo nousi työn aikana alkuarvosta noin 0,20–0,25 bar. Huokospaineen arvo laski tasaisesti toimenpiteiden välissä muissa mittauspisteissä paitsi pisteessä P4, jossa huokospaineen arvo on tasaisesti ja hitaasti noussut koko tarkkailuajan. (Destia 2013.)

Kymijoen inklinometrimittausten tuloksista voidaan havaita, että liikesuunnat työn aikana ovat olleet tiehen päin ja jokeen päin (Kuva 29). Siirtymät ovat olleet enimmillään noin 20–30 mm kumpaankin suuntaan. Inklinometri S1 mittausjakso jäi lyhyemmäksi ja mitatut siirtymät olivat siten hieman pienempiä. (Destia 2013.)



Kuva 28. Esimerkki huokospainemittaustuloksista (TYL Pulteri 2013).

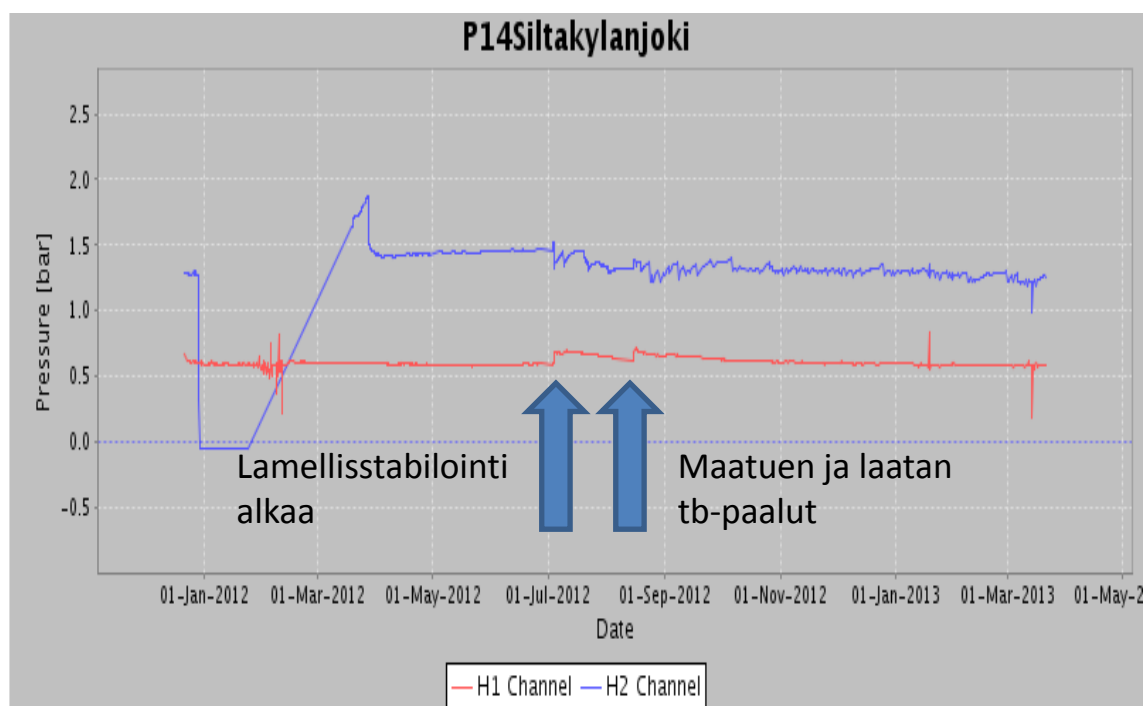


Kuva 29. Kymijoen inklinometrimittaus S2. A-suunta positiivinen tielle päin ja B-suunta positiivinen joesta poispäin. (FinMeas 2013a.)

7.3.3 Mittausten toimivuus ja luotettavuus

Huokospainemittaustulokset ovat kuvaajien perusteella toimineet oikein lukuun ottamatta mittauspisteen P14 alemmaa anturia (Kuva 30). Paalutuksen vaikutus mitattuihin huokospaineen arvoihin riippuu lyötävän paalun ja anturin etäisyydestä. Anturin lähellä lyödyt paalut aiheuttavat mitatun huokospaineen hetkellisen merkittävän ja piikkimäisen kasvun tai pienenemisen riippuen mittaushetken tilanteesta. Siltakylänjoen mittauksista nähdään myös, että eri syvyyksiltä mitatut huokospainemuutokset voivat olla suuruudeltaan ja ajankohdalta hieman toisistaan eroavia (Kuva 28).

Siltakylänjoen mittauspisteen P14 alempi huokospaineanturi on mittauksen alkamisen jälkeen mitannut oikeankaltaista arvoa muutaman päivän ajan. Tämän jälkeen mitattu huokospaineen arvo on tippunut hieman negatiivisen paineen puolelle noin kuukauden ajaksi. Mitattu arvo on noussut tasaisesti noin kahden kuukauden ajan, jonka jälkeen arvo on tasoittunut noin 1,5 bariin. Myöhemmin kun ylempi anturi on osoittanut huokospaineen nousua, alempi anturi näyttää huokospaineen laskevan. Mittauspisteen P14 alempi huokospaineanturi mittaa siis virheellistä lukemaa, mutta ylempi anturi toimii oletettavasti oikein. Kymijoen huokospainemittaus P4 on osoittanut tasaisesti kasvavaa huokospainekehitystä, joka johtuu oletettavasti kuormituslisäyksestä.



Kuva 30. Huokospainemittarin P14 mittaustulokset (TYL Pulteri 2013).

Kymijoen inklinometri S1 on mittaustuloksissa on mittausten alusta asti ollut hajontaa, jonka suuruus peräkkäisten mittauskertojen välillä saattoi olla 10 mm. Mittaus on aloitettu uudelleen 25.4.2012, jonka jälkeen hajonta on ollut alle 2 mm. Mittauksissa esiintyy tämän jälkeen vain yksittäisiä poikkeavia mittaustuloksia, mutta ne voivat johtua

esimerkiksi tärinästä mittaushetkellä. Toinen inklinometri S2 on toiminut moitteettomasti. Inklinometrikuvaajista tulee kuitenkin huomata, että siirtymä alkaa heti ensimmäisestä anturista, joka ei ole suotavaa ja voi aiheuttaa mittaukseen todellista pienempiä siirtymiä (Kuva 29). Alimman anturin liikkuminen voi johtua joko putken alaosan huonosta tukeutumisesta tai siitä, että automaatti-inklinometri on liian lyhyt. Inklinometrit ovat mitanneet siirtymää, jonka suunta on tiepenkereeseen päin. Mittaustulos on oletettavasti oikea ja johtuu pengertäytön painumisesta.

7.3.4 Tavoitteen toteutuminen

Monitoroinnilla on saatu varmistettua jokipenkereen riittävä stabiilitetti työaikana. Huokospainemittausten perusteella on ollut mahdollista tarkkailla huokospainekehitystä lähes reaaliaikaisesti ja tarvittaessa muuttaa paalutusaikataulua. Huokospaineen nousu on pysynyt pienempänä kuin asetettu hälytysraja. Ainoa merkittävämpi mittauslaitteistoon liittyvä ongelma oli Kymijoen inklinometri S1.

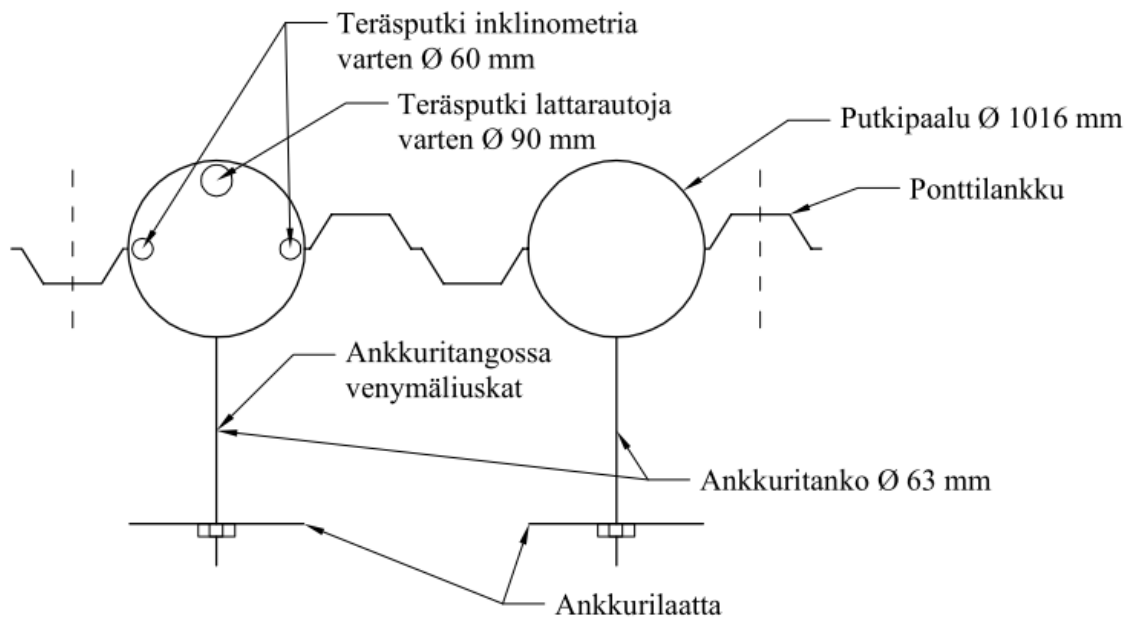
7.4 Jätkäsaaren putkiponttiseinä

7.4.1 Kohteen esittely

Jätkäsaaren putkiponttiseinä on osa Jätkäsaaren laiturin laajennusta (Kuva 31). Uusi putkiponttiseinä on 30 m pitkä välirakenne vanhan ponttiseinän ja uuden betonielementtilaiturin välissä. Tarkemmat suunnitelmapiirustukset kohteesta ovat liitteessä 4. Vesisyvyys on laiturin vieressä noin 12 m ja laituri on noin 3 m vedenpinnan yläpuolella. Putkipontit rakennettiin mereen, jonka jälkeen laiturin puolelle tehtiin ankkurointi, tautatäyttö ja -paalutus. Putkipaalut ovat halkaisijaltaan 1016 mm ja niiden pituus on noin 30 m (Kuva 32). Putkipaalut on varustettu kalliokärjillä ja putkipaalujen välissä on kaksi ponttiin lyötyä ponttilankkua. Putkiponttiseinä on ankkuroitu tasolta +0,2 putkipaaluista 63 mm teräsankkureilla ankkurilaattoihin. (Andersson-Berlin 2013.)



Kuva 31. Kuva kohteesta, etualalla vanha laituri (Luomala 2012b).



Maatäyttö ja paalutus

Kuva 32. Havainnekuva Jätkäsaaren putkiponttiseinän mittausjärjestelystä.

7.4.2 Mittausmenetelmät

Mittaukset suoritettiin Helsingin Sataman tilauksesta. Mittausten suunnittelu alkoi vasta, kun työmaa oli jo käynnissä, joten mittaukset piti saada nopeasti käyntiin. Mittauk-

silla oli tarkoitus selvittää louheesta tehdystä taustatäytöstä putkiponttiseinään aiheutuvaa maanpainetta. Maanpainetta ei kuitenkaan mitattu suoraan maanpaineantureilla. Kohteessa mitattiin kahdella automaatti-inklinometrillä putkipaalun taipumaa sekä venymäliuskoilla lattarautojen ja ankkuritankojen muodonmuutoksia. Lattarautojen ja ankkuritankojen kimmokerroin ja poikkileikkausala tunnetaan, joten venymäliuskan mittaustulosten perusteella voidaan laskea mittauskohdassa vallitseva jännitys ja voima. Kaikki kolme mittaustapaa ovat toisistaan riippumattomia, mutta ne mittaavat saman putkipaalun liikkeiden vaikutuksia. Ankkuritankoihin ankkurilaattojen taakse oli tarkoitus laittaa FinMeas Oy:n voima-anturit, mutta niitä ei ehditty toimittaa ajoissa tiukan aikataulun johdosta. (Andersson-Berlin 2013.)

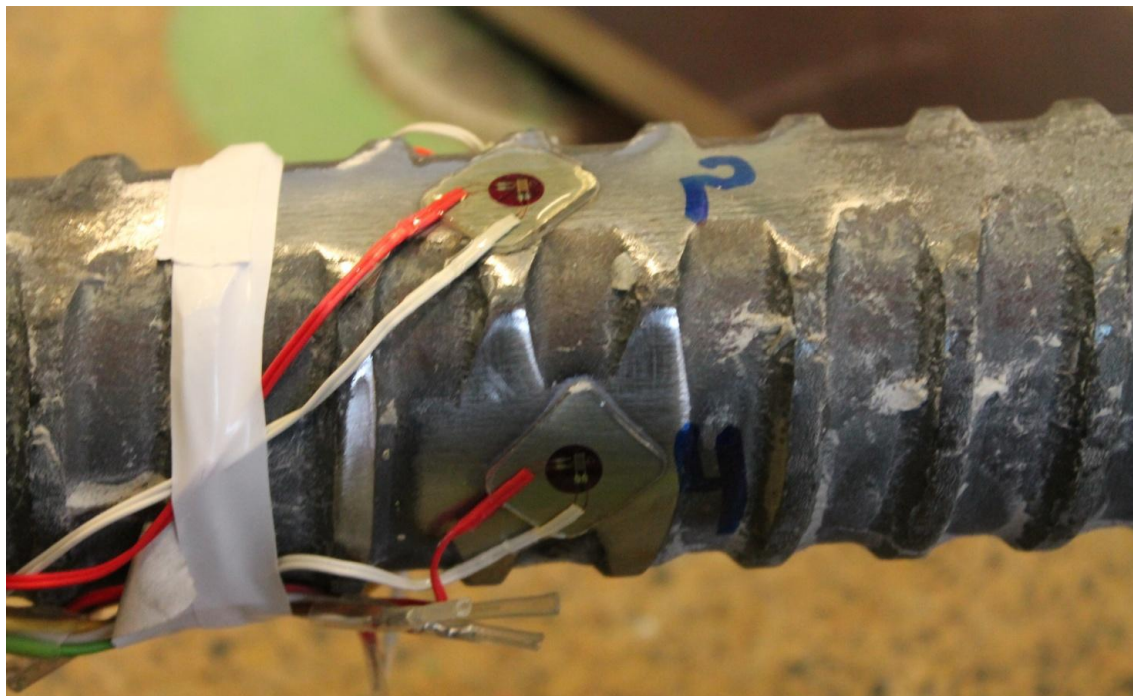
Mittaukset alkoivat marraskuun 2012 lopulla, jolloin putkiponttiseinä ja ankkurointi olivat valmiit, mutta taustatäyttöä tai paalutusta ei ollut vielä aloitettu. Taustatäyttöä rakennettiin mittauskohdassa marraskuun lopulta joulukuun puolenväliin. Tämän jälkeen aloitettiin taustapaalutus, joka valmistui mitatun putkipaalun kohdalla 19.12.2012. (Arcus 2013.)

Automaatti-inklinometrit olivat FinMeas Oy:n toimittamia. Niitä varten asennettiin rakennusvaiheessa kaksi 60 mm teräsputkea tutkittavan putkipaalun keskiakselille molempiin sivuihin. Putkien pohja tulpattiin, putket kiinnitettiin putkipaalun raudoitukseen ja putkipaalu valettiin täyteen betonia. Automaatti-inklinometrit asennettiin näiden teräsputkien sisään ja ylimääräinen tila täytettiin hiekalla. (Andersson-Berlin 2013.)

Lattaraudat, joihin venymäliuskat olivat kiinnitetty, asennettiin niitä varten varattuun teräsputkeen. Teräsputki sijaitsi saman putkipaalun sisällä, kuin inklinometrejä varten asennetut teräsputket ja lähellä merenpuoleista pintaa. Teräsputki oli asennettu samalla tavalla, kuin inklinometrejä varten tehty teräsputket, mutta lattarautoja varten käytettiin 90 mm putkea. Mittauslaite koostui yksittäisistä lattarautoista, jotka oli kiinnitetty toisiinsa pulttiliitoksien kahden metrin välein. Mittauslaitteisto oli Tampereen teknillisen yliopiston rakentama ja asentama. Jokaiseen lattarautaan oli kiinnitetty venymäliuskaantureita, jotka oli suojattu tiivistysmassalla. Lattaraudat keskitettiin teräsputkeen ja suojaputki täytettiin vielä betonilla, jolloin rakenteesta tuli putkipaalun kanssa käytännössä yhtenäinen. Lattarautoista pystyttiin mittaamaan niiden venymää, jonka avulla saatiin laskettua lattaraudan jännitys ja vallitseva voima sekä suuntaa-antavasti putkipaalun taipuma. (Andersson-Berlin 2013.)

Yksi ankkuritangoista varustettiin venymäliuska-anturein (Kuva 33). Venymäliuskaanturit kytkettiin sarjoiksi ja yhteen kytketyt anturit asennettiin ankkuritangon ympärille, jolloin saatiin mitattua tangon venymä neljästä suunnasta. Anturisarja mitattiin yhdessä, joten mittaustulos on neljän suunnan keskiarvo. Mittausjärjestelyllä oli tavoitteen-

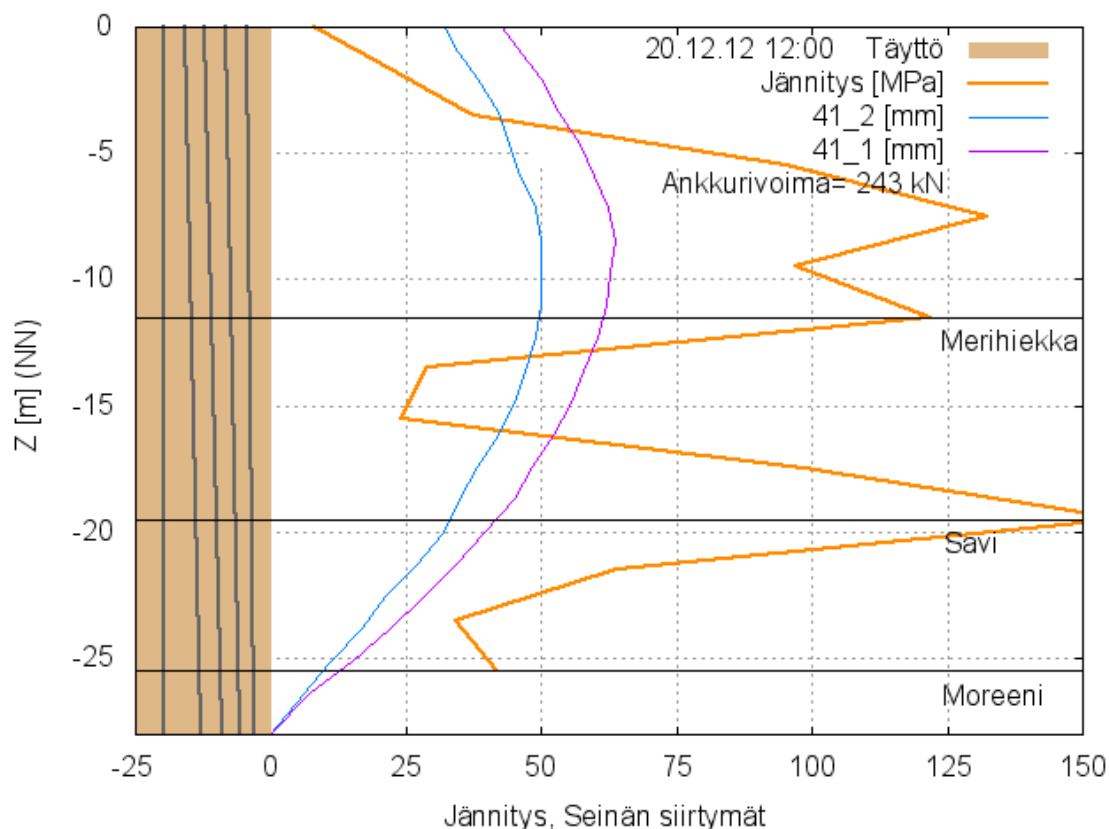
na poistaa ankkuritangon taipuman vaikutus tuloksiin, jolloin mitattava venymä aiheutuisi ainoastaan ankkuriin kohdistuvasta voimasta. Neljän anturin sarjoja asennettiin yhteensä kolme kappaletta hieman eri kohtiin ankkuritankoa. (Andersson-Berlin 2013.)



Kuva 33. Ankkuritankoon kiinnitettyjä venymäliuskoja (Luomala 2012a).

7.4.3 Mittaustulokset

Inklinometrimittaukset alkoivat 28.11.2012, jonka jälkeen mittauksia on tehty tunnin välein. Inklinometrimittausten perusteella siirtymiä alkoi muodostua taustatäytön yhteydessä ja 12.12.2012 taustatäytön valmistuttua toinen inklinometri mittasi 20 mm ja toinen 26 mm suuruisen siirtymän mereen päin. Taustapaalutuksen yhteydessä tapahtui huomattavasti nopeampia siirtymiä ja paalutuksen jälkeen 20.12.2012 siirtymät olivat inklinometreissä 63 mm ja 50 mm (Kuva 34). Taustapaalutuksen jälkeen siirtymien kehitys on ollut hidasta ja siirtymät ovat kasvaneet enää muutamia millimetrejä. Siirtymien suuruus mereen päin oli 13.1.2013 tehtyjen mittausten perusteella toisessa inklinometrissä 67 mm ja toisessa 54 mm. Suurimmat siirtymät ovat tapahtuneet noin 10–13 m syvyydessä laiturin pinnasta. (Arcus 2013, FinMeas 2013a.)



Kuva 34. Mittaustulokset taustapaalutuksen jälkeen (Arcus 2013).

Inklinometrit ovat mitanneet myös sivuttaissuuntaista siirtymää. Taustatäytön valmistuttua sivusiirtymien suuruus on ollut inklinometrissä riippuen noin 18 mm tai 20 mm vasemmalle rannasta katsottuna. Taustapaalutuksen jälkeen siirtymän suuruus ensimmäisessä inklinometrissä on ollut 12 m syvyydessä noin 17 mm ja noin 20 mm pinnassa. Toisessa inklinometrissä siirtymän suuruus on ollut 20 m syvyydessä noin 33 mm ja 28 mm pinnassa. Sivusiirtymien suuruudeksi 13.1.2013 on mitattu ensimmäisessä inklinometrissä noin 15 mm ja toisessa noin 33 mm. (Arcus 2013, FinMeas 2013a.)

Lattarautojen venymämittauksien tulokset on ilmoitettu lattarautoissa vallitsevina jännityksinä. Positiivinen jännityksen arvo tarkoittaa, että putkipaalu on taipunut mitattavan lattaraudan kohdalta mereen päin eli putkipaalu merenpuoleinen pinta on pidempi kuin maataytönpuoleinen pinta. (Andersson-Berlin 2013.) Ylin anturi on tasossa +0,48 m yläpuolella ja alin anturi -25,48 tasossa (Liite 4). Antureita on siis 2 m välein yhteensä 14 kappaletta, joista jokainen mitattiin erikseen. Erillisistä mittauksista on muodostettu jatkuva jännityskuvaaja. (Andersson-Berlin 2013) Jännitykset kasvoivat taustatäytön rakentamisen yhteydessä ja 12.12.2012 jännitysten maksimiarvo oli noin 60 MPa. Suurimmat jännitykset mitattiin tasoilla -5...-10 sekä -20, joka on merihiekan ja saven kerrosrajan kohdalla. Taustapaalutuksen yhteydessä jännitysten suuruus kasvoi merkittävästi ensin tasolla -20, suurimmillaan arvoon 150 MPa sekä paalutuksen edetessä tasoilla -7 ja -12 arvoon 130 MPa. Tämän jälkeen jännitysten suuruus ja sijainti lähes vakiin-

tuivat, paitsi tasolla -20 jossa jännitykset laskivat arvoon 100 MPa 13.1.2013 mennessä. (Arcus 2013.)

Ankkuritankojen venymäliuska-anturien tulokset on muutettu vastaamaan ankkuritan-koihin kohdistuvaa voimaa. Kaikista kolmesta anturisarjasta saadaan erillinen mittaustu-los. Mittaustuloksissa on nähtävissä selkeästi ankkurivoiman kasvu täytön aikana, mutta paalutuksen yhteydessä ankkurivoima väheni hetkellisesti. Ankkurivoimat olivat kol-messa mittaussarjassa lähes yhteneväiset ennen paalutusta, mutta paalutuksen jälkeen yhden anturisarjan tulokset poikkesivat jonkin verran kahdesta muusta. (Andersson-Berlin 2013, Arcus 2013.)

7.4.4 Mittausten toimivuus ja luotettavuus

Inklinometrimittauksissa alimman mittaustason oletetaan pysyvän paikallaan ja siirty-mät lasketaan alimman kiinteän pisteen suhteen. Putkipaalun yhteydessä alin inkli-no-metrianhuri on kuitenkin 1,7 m kalliokärjen alapintaa ylempänä, joten putkipaalun ala-osan liikkeitä ei voida tietää. Laskennallisesti alimman inklinometrianhurin kulman voi-daan olettaa jatkuvan paalun kärkeen asti, joka on oletettavasti paalun tukipiste. Putki-paalun alaosan siirtymä voidaan myös jättää huomioimatta siirtymälaskelmissa, sillä moreenissa olevan paalunosan taipuma on luultavasti erittäin vähäistä, eikä siten vaikuta merkittävästi tuloksiin. (Andersson-Berlin 2013).

Inklinometrimittausten alkamisen jälkeen mittaustuloksissa havaittiin putkipaalun ylä-osassa pistemäisiä ja vain yhdessä mittauksessa esiintyviä siirtymiä. Näiden mittaustu-losten syyksi pääteltiin meren aallot, jotka pääsivät heiluttamaan vain ankkuritangoilla tuettua putkipaaluseinän yläosaa. (Ylönen 2013.)

Maatäytön alkaessa inklinometri mittaamien siirtymien suuruudet poikkesivat hieman toisistaan siten, että inklinometri 41_1 näytti suurempaa siirtymää mereen päin. Mitta-ustuloksista voidaan kuitenkin havaita, että mereen päin suurempaa siirtymää mittaava inklinometri antaa sivusuuntaiselle siirtymälle pienemmän arvon kuin toinen inkli-no-metri 41_2. Sivusuuntaiset siirtymät osoittivat paalun olevan sivusuunnassa kallistunut, mutta siten että putkipaalu on pysynyt likimain suorana. (Arcus 2013, FinMeas 2013a.) Tuloksista voidaan päätellä, etteivät inklinometrit ole alunperinkään keskenään aivan samassa suunnassa. Tällöin ainakin toinen inklinometri olisi haluttuun suuntaan nähden hieman kääntynyt, eikä mittaisi aivan oletetun suuntaista siirtymää. Inklinometri mittaustulosten ero voitaisiin ainakin osittain olettaa johtuvan edellä mainitusta syystä.

Inklinometri yläpään siirtymä oli mereen päin lähes yhtä suuri molemmissa inkli-no-metreissa 14.12.2012 asti, jolloin paalutustyö oli jo käynnissä, mutta ei vielä mitatun putkipontin kohdalla. Seuraavana päivänä inklinometri yläpäiden siirtymien suuruus

poikkesi toisistaan enemmän, keskimäärin noin 10 mm, ja ero kasvoi paalutuksen edetessä. Paalutus eteni putkiponttiseinän suuntaisesti, joten on mahdollista, että paalutuksen yhteydessä putkipaalu on kääntynyt tai kiertynyt. Paalutuksen yhteydessä maanpaine on kasvanut, jolloin putkipaaluseinä on taipunut mereen päin. Ankkurointi on pitänyt putkipaalun yläpään tuettuna, joten ankkurointitasolta siirtymä ei merkittävästi kasvanut. Paalutuksen edetessä mitatun putkipaalun ohi, putkipaalun asento ei enää palautunut alkuperäiseksi. Jatkasaari41_2-inklinometrin tuloksista nähdään selvästi sivusuuntaista taipumaa ja kaareutumista, joka voidaan olettaa pieneksi. Myös Jatkasaari41_1-inklinometri on sivusuunnassa taipunut. (Andersson-Berlin 2013, Arcus 2013, FinMeas 2013a.) Ponttiin lyötyjen putkipaalujen taivutusjäykkyys seinän suunnassa on huomattavasti suurempi kuin poikkisuunnassa, eikä seinän suuntaisia voimia pitäisi muutenkaan juuri muodostua. Mittaustulosten perusteella voidaan päätellä, että putkipontti on kiertynyt ankkuritason alapuolelta paalutuksen aikana.

Lattarautojen venymäliuskamittausten toiminta on ollut laitteiston puolesta virheetöntä, mutta tulosten hyödynnettävyys on kyseenalainen. Täytön aikana mittaustuloksista piirretyt kuvaajat olivat piirteiltään pyöreitä, kuten voitiin olettaa. Putkipaalun muodonmuutokset eivät ole pistemäisiä ja muodonmuutoksesta aiheutuva jännitykset jakautuvat putkipaalussa laajalle. Saven ja merihiekan rajapinnassa on ainoa terävä jännityspiikki.

Paalutuksen yhteydessä jännitysten muutokset tulivat terävämmiksi, joka voi johtua lattarautojen asennusputken betonointiin syntyvistä halkeamista. Venymäliuskan kohdalta betonointi on ohuimmillaan ja halkeama venymäliuskan kohdalta aiheuttaisi paikallisen venymähuipun. Putkipaalun yläosan venymäliuskojen tuloksissa näkyi myös hajontaa, jonka epäiltiin johtuvan lämpötilanmuutoksista. Muita mahdollisia syitä ovat virheellisesti toimiva anturi tai tuulen ja aaltojen vaikutus. Ylimmän anturin jännityksen olisi pitänyt olla lähes nolla, mutta tulosten hajonta oli merkittävää. Venymäliuska-anturit mittasivat lattaraudan jännityksen tietyssä kohdassa, mutta jännityksiä putkipaalussa ei voida tarkasti arvioida, koska neutraaliakselin sijaintia ei tiedetä. Myöskään paalun pinnassa vaikuttavan jännityksen maksimiarvoa ei tiedetä. (Andersson-Berlin 2013.) Mitatut jännitykset osoittavat jännityksien olevan suurimmillaan kohdissa, joissa inklinometrillä mitattu kulmanmuutos on suurin. Lisäksi maakerrosrajojen aiheuttamat muutoksen näkyvät lattarautojen jännityksissä selvästi, kuten myös maakerrosten sivutaistuki.

Ankkuritankojen venymäliuskamittauksissa on esiintynyt oletuksista poikkeavia tuloksia. Täytön aikana jännitykset kasvoivat täytön mukana, mutta paalutuksen alkaessa mitatut jännitysten arvot pienenivät. Mahdollisia selityksiä tähän ovat ankkurilaattojen vetykyvyn loppuminen, vetotankojen taipumien oikeneminen ja paalutuksen aiheuttama maan löyhtyminen ankkurilaattojen kohdalta. Ankkuritankojen jännitys kasvoi paalu-

tuksen edetessä likimain saman arvoon kuin ennen paalutusta. Venymäliuska-anturisarjat näyttivät keskenään hieman erilaisia tuloksia, joten todellista ankkurivoimaa ei aivan tiedetä. Antureiden liittämisellä sarjaan oli tarkoitus poistaa tuloksista ankkuritangon taipuman vaikutus, mutta tuloksien tulkintaa varten olisi ollut hyvä saada tietoa myös ankkuritangon taipumasta. (Andersson-Berlin 2013, Arcus 2013.)

7.4.5 Tavoitteiden toteutuminen

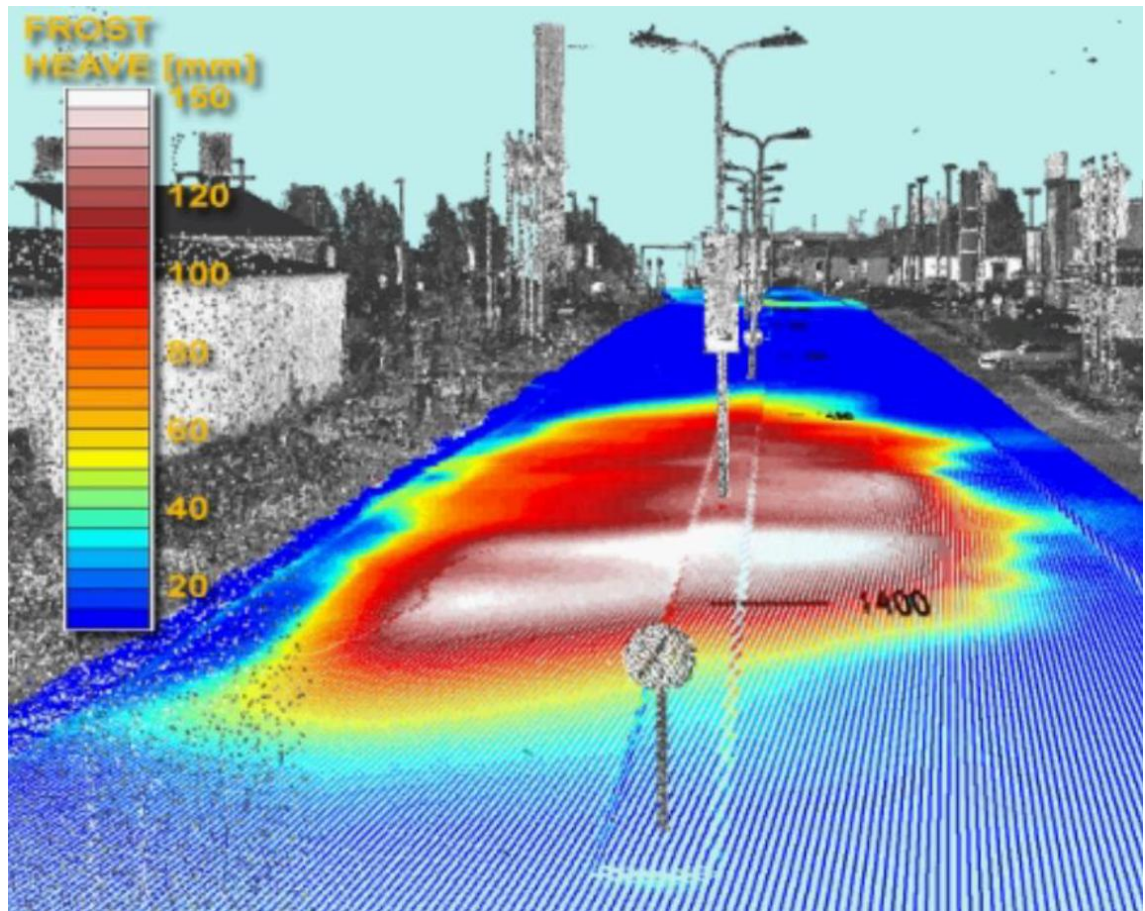
Monitoroinnin alkuperäinen tarkoitus oli putkiponttiseinään kohdistuvan maanpaineen mittaaminen. Kohteessa maanpainetta pyrittiin arvioimaan muiden mittausten avulla, ilman varsinaista maanpainemittausta. Käytetyt mittausten menetelmät olivat automaattinklinometriä lukuun ottamatta kyseistä kohdetta varten valmistettuja. Aikataulu aiheutti oman ongelmansa mittausten suunnitteluun ja mittauslaitteiden hankintaan. Kaikki mittauslaitteet pysyivät ehjinä ja toimivat tiettävästi teknisesti oikein koko monitorointijakson ajan. Venymäliuskamittausten mittausjärjestelyn kokeiluluonteisuudesta johtuen kaikilta ongelmilta ei välttytty ja mitattujen arvojen tulkinnassa tulee arvioida tulosten luotettavuus. Putkipaaluseinään vaikuttavaa maanpainetta pystyy kuitenkin arvioimaan saatujen tulosten perusteella.

7.5 Esimerkki laserkeilaustulosten visualisoinnista

Tässä kohdassa käsitellään laserkeilauksen visualisointia ja sen käyttöä monitoroinnissa. Laserkeilausta voidaan käyttää rakenteiden ja ympäristön pintojen kartoittamiseen sekä muutosten havaitsemiseen kolmiulotteisen mallin avulla. Suomessa menetelmää on käytetty yleisimmin katujen, teiden ja tunneleiden mittaukseen ja visualisointiin. Laserkeilauksessa mitataan tietyn pisteen etäisyys ja kulma keilaimesta, joka voidaan yhdistää koordinaatistoon, kun keilaimen sijainti tunnetaan. Tavallisesti liikkuva laserkeilauslaitteisto sisältää laserkeilauslaitteiston, joka on yhdistetty paikannuslaitteistoon, kuten GPS-paikantimeen. Tiedoista muodostetaan pistepilvi, jonka jokaisella pisteellä on koordinaatti. (Saarenketo et al. 2012, Silvast 2013.) Laserkeilaimella tuotetun koordinaattiaineiston tarkkuuteen vaikuttaa merkittävästi kiintopisteiden määrä tai GPS-paikantimella mitattu tarkkuus. Yleistäen laserkeilain on tarkka, mutta tarkkuus heikenee, kun tieto sidotaan yleiseen koordinaatistoon. Tarkka mittaus vaatii riittävän määrän kiintopisteitä lähellä mittauskohdetta. (Silvast 2013.)

Laserkeilauksella voidaan osoittaa missä muutoksia on tapahtunut. Menetelmällä pystytään mittaamaan laajoja alueita liikkuvalla kalustolla ja mittaustarkkuus on riittävä pinnassa tapahtuneiden muodonmuutosten havaitsemiseen. Esimerkiksi routanousua voidaan arvioida, kun kohde mitataan syvimmän roudan aikaan ja sulan maan aikana. Samalla tavalla voidaan mitata myös muita pinnanmuodon muutoksia. Mittausten välillä tapahtuneet muutokset lasketaan ja ne voidaan havainnollistaa visuaalisessa mallissa värein (Kuva 35). Laserkeilausta voidaan käyttää korjaustarpeen ja -kohteiden enna-

kointiin. Tarvittaessa havaittuja kohtia voidaan mitata tarkemmin muilla menetelmillä, jos se on tarpeen. (Saarenketo et al. 2012, Silvast 2013.)



Kuva 35. Esimerkki visualisoidusta laserkeilauksella mitatusta routanoususta (Saarenketo et al. 2012).

Laserkeilausta voidaan käyttää myös laadunvalvonnassa esimerkiksi tiekohteissa, joissa ensimmäinen mittaus tehdään kun tie on valmis ja mittaus suoritetaan uudelleen takuuajan lopulla. Mahdolliset virheet voidaan tällöin havaita ja korjata ennen takuuajan loppumista. (Silvast 2013.)

Menetelmällä voidaan myös mitata pintamalli ja verrata sitä suunnitelmaan, jolloin nähdään mahdolliset sijaintipoikkeamat. Esimerkiksi Crusellin sillan rakentamisessa on käytetty hyväksi laserkeilauksella tuotettua pintamallia, jota verrattiin sillasta tehtyyn tietomalliin.

8 Kokemukset kohteista

Luoman seisakkeella roudan syvyyden mittauksessa ilmennyt lumivalliin liittyvä ongelma olisi ollut helposti estettävissä, mutta asennushetkellä etäisyys reunasta vaikutti riittävältä. Lämpötilamittarin asentaminen keskemälle pysäköintialuetta olisi ollut pieni vaiva. Asennuspaikkaan olisi siis kokemusten perusteella pitänyt kiinnittää enemmän huomiota ja mittauslaite olisi pitänyt asentaa vielä kauemmas alueen reunasta. Mittauslaitteiston toiminta ja edellytykset oikealle toiminnalle tulee varmistaa, mikäli se on mahdollista. Luoman kohteessa tämä tarkoittaisi mittauspaikan ja -laitteiston satunnaisista tarkistamista silmämääräisesti ja tarvittaessa lumien siirtoa, joka Luoman kohteessa myöhemmin tehtiinkin. Mittauslaitteisto tulee siis tarkistaa silmämääräisesti, etenkin jos olosuhteilla tai vuodenajalla voi olla vaikutusta mittauslaitteiston toimintaa tai mittaustuloksiin.

Käytännön syistä johtuen Luoman seisakkeen mittauslaitteistot asennettiin talvella, joka oli asentamisen helppoutta ajatellen väärä ajankohta. Jäätynyt murske ei ollut helpoin asennusalausta ja saattoi heikentää tulosten tarkkuutta kevään aikana. Lisäksi painumalevyjen asentamistapa vaihdettiin, kun ennalta ajateltu asentamistapa havaittiin hankalaksi. Mittauslaitteisto tulisi pyrkiä asentamaan ajankohtana, jolloin asentamisen onnistuminen ja mittauslaitteiston toiminta pystytään parhaiten varmistamaan. Ajankohta voi olla suhteessa vuodenaikaan tai rakentamisvaiheeseen. Toisaalta ongelmaksi voi muodostua se, että eri mittauslaitteistoille sopisi eri asentamisajankohta ja yleensä mittauslaitteet asennetaan likimain samanaikaisesti. Tällöin tulee miettiä kohteeseen sopivin asennusjärjestely, jolla laadukkaiden mittaustulosten saavuttaminen on mahdollista.

Luoman seisakkeen vaaitusten kiintopiste oletettiin liikkumattomaksi, mutta myöhemmillä selvityksillä asiaa ei voitu varmistaa. Luoman kohteessa kiintopisteen mahdollinen korkeussuuntainen liike ei myöskään ole kriittistä, sillä mittauksilla haluttiin vain tarkkailla pysäköintialueen routanousua. Vaaituksessa ja takymetrimittauksessa kiintopisteinä käytettävien kohteiden tulisi olla varmasti liikkumattomia, joka varmistetaan parhaiten kallioon asennetulla kiintopisteellä. Aina sopivia kiintopisteiden sijainteja ei ole saatavilla, jolloin tulisi valita useampi oletettavasti liikkumaton kiintopiste. Vertailemalla kiintopisteiden korkoja voidaan selvittää mahdollisia kiintopisteissä tapahtuvia siirtymiä. Kiintopisteiden luotettavuudesta olisi myös hyvä esittää jokin arvio mittaustulosten yhteydessä, etenkin jos kiintopiste ei ole varmasti liikkumaton.

Kolmessa tässä työssä käsitellyistä kohteista oli käytetty FinMeas Oy:n automaattinklinometriä, joiden lisäksi Mäenkylässä on käytetty myös manuaali-inklinometriä. Inklinometri soveltuu maan ja tukiseinien sivusuuntaisten liikkeiden seurantaan, kun halutaan syvyysuunnassa jatkuva siirtymäprofiili. Inklinometri on erittäin havainnolli-

nen mittauslaite, sillä tulokset pystytään ilmoittamaan suoraan siirtyminä, jotka kuvaavat todellisen liikkeen suuruuksia tietyllä syvyydellä. Inklinometri ei kuitenkaan mittaa todellista siirtymää, sillä inklinometrillä mitataan kulman arvoja pistemäisesti. Mitatun kulman oletetaan edustavan antureiden välistä kulmaa, vaikka todellisuudessa se ei pidä aivan paikkaansa. Tavallisesti inklinometriputki on lähes suora, jolloin mittauspisteiden välin interpoloiminen ei aiheuta merkittävää virhettä. Todellista siirtymää voidaan tukiseinien kohdalla mitata takymetrillä ja maahan upotettavista inklinometriputkista voidaan mitata putken yläosan sijainti, jota verrataan inklinometrimittauksen osoittamaan siirtymään.

FinMeasin toimittamien automaatti-inklinometrien toiminta virheellisten mittausten osalta on ollut ongelma kahdessa kohteessa. Yleensä tämä on ilmennyt isoina muutoksina, joiden suunta on voinut vaihdella mittauksesta riippuen. FinMeas on pyrkinyt aktiivisesti parantamaan inklinometrilaitteiston luotettavuutta ja molemmat virheellisiä tuloksia ilmoittavat laitteistot on saatu toimimaan. Samalla Mäenkylässä saatiin vähennettyä mittaustulosten hajontaa. Tärkeissä kohteissa tulosten varmistaminen toisella inklinometrillä tai muulla mittauslaitteistolla on suotavaa, jotta välttytään mittausvirheistä johtuvista virhearvioinneista. Automaattinen inklinometrimittaus on kuitenkin käytännössä ainoa järjestelmä, jolla pystytään mittaamaan tiheästi ja lähes reaaliaikaisesti vaakasuurtaisia siirtymiä maan sisässä.

Mäenkylässä on useista inklinometreistä huolimatta ollut vaikeuksia luottaa penkereen vakavuuteen, sillä vastapenkereen inklinometrit ovat mitanneet siirtymiä. Johtopäätös mittauksista on, että pengeri pysyy paikallaan ja vastapenger on edelleen liikkeessä. Mäenkylässä tehtyjen tutkimusten perusteella vahvistustoimenpiteiden tarpeellisuutta ei ole pystytty poissulkemaan. Kattavat mittauksetkaan ei siis välttämättä riitä, jos kohteen stabiiliteetti on turvallisuuden kannalta kriittinen.

Valtatien 7 parantamiskohteen huokospainemittauksista havaitaan, että yhteen mittauskohtaan on hyvä asentaa kaksi mittausanturia. Tällöin mittausvirheiden havaitseminen helpottuu ja varmuus mittaustulosten oikeellisuutta kohtaan kasvaa. Lisäksi toisen anturin asentaminen on usein pieni kustannus, jos se saadaan liitettyä osaksi asennettavaa mittauslaitteistoa. Valtatie 7 kohteessa inklinometrien lisäksi olisi voinut olla syytä asentaa myös siirtymäpultteja, jolloin epäselvissä tilanteissa siirtymien mittaaminen takymetrillä olisi ollut mahdollista. Maahan asennettavista siirtymäpulteista aiheutunut lisäkustannus olisi ollut vähäinen. Toisaalta kohteessa asennetut mittauslaitteet olivat Liikenneviraston velvoittamia ja mittaukset toteutettiin tämän mukaisesti.

Jätkäsaaren kohde eroaa muista käsitellyistä kohteista siinä, että siellä mittauslaitteisto rakennettiin pitkälti kyseistä kohdetta varten. Automaatti-inklinometri oli ainoa koh-

teessa käytetty kaupallisesti saatavissa oleva mittauslaitteisto. Tampereen teknillinen yliopisto rakensi muut mittauslaitteistot tätä kohdetta varten. Koeluontoisesta mittausjärjestelystä johtuen mitattavat suureet pyrittiin mittaamaan useammalla anturilla, jolloin yhden anturin vikaantuminen ei merkittävästi häiritse tulosten luotettavuutta ja käyttökelpoisuutta. Eri mittauslaitteiden tuloksia pystyttiin myös vertaamaan hieman keskenään, mutta lähinnä tuloksista nähtiin, että muutokset aiheuttivat kaikissa laitteissa keskenään oikean suuntaisen muutoksen.

Ankkuritankojen venymäliuskat olisi ollut parempi mitata jokainen venymäliuska erillisinä, jolloin virheellisten anturien havaitseminen olisi helpompaa. Nyt tulos mitattiin anturisarja kerrallaan, jolloin tulosten käsittely oli helpompaa, mutta viallisten antureiden määrittäminen lähes mahdotonta. Mahdollisesti tämä ei olisi antanut tuloksiin lisäarvoa, mutta olisi lisännyt käsiteltävien tulosten määrää.

Jätkäsaassa paalutus aiheutti kaikissa mittauslaitteissa oletuksista poikkeavia tuloksia, joiden syitä ei tulosten perusteella pystytä varmasti selvittämään. Ankkuritangon jännitysten mittaamien Load cell -tyyppisellä voima-anturilla olisi voinut antaa lisätietoa ankkuritangon venymäliuskojen toiminnasta. Paalutuksen yhteydessä putkipaalu ilmeisesti kiertyi, mutta aivan varmasti asiaa ei pysty tulosten perusteella päättämään.

Putkipaalun jännityksiä mitattiin lattarautojen venymän avulla putkipaalun sisästä. Venymämittaus ei toiminut aivan toivotulla tavalla, vaan tuloksissa havaittiin piikkimäisiä jännityksen arvoja. Tulosten arvioinnissa tulee miettiä, kuinka suuria todelliset jännityksen arvot ovat ja jättää huippuarvot huomioimatta. Alun perin lattarautoilla oli tarkoitus mitata putkipaalun jännityksiä, mutta tämä vaatisi jännitys jakauman tuntemisen. Jännitys jakauma olisi ollut ehkä mahdollista määrittää asentamalla putkipaalun toiselle sivulle samanlainen lattarautamittaus. Putkipaalun laiturin puoleinen sivu on kuitenkin purettu, jolloin putkipaalun sisäpuolinen betonointi olisi tasannut jännityksiä toisin kuin vetopuolella. Paras tulos saavutettaisiin, jos venymäliuskat pystyttäisiin asentamaan suoraan putkipaalun seinään kiinni. Tällöin mittauslaitteiden asentaminen ja laitteistojen ehjänä pitäminen olisi huomattavasti hankalampaa ja asentaminen häiritse enemmän myös työmaata.

Ainakin Jätkäsaassa yksi merkittäviä ongelmia oli se, että mittaukset suunniteltiin jälkikäteen jo käynnissä olevalle työmaalle. Suunnitelmat jouduttiin tekemään nopeasti ja putkiponttiseinästä tehtävät mittaukset mietittiin suunnittelun yhteydessä. Valmista mittaussuunnitelmaa tai ohjeistusta ei ollut käytettävissä (Andersson-Berlin 2013). Lisäksi aikataulu vaikutti myös mittauksiin, sillä Load Cell -laitteistoa ei ehditty hankkia ajoissa. Kiireiseen aikatauluun vaikutti osaltaan se, että monitorointi tehtiin mielenkiinnosta maanpainetta kohtaan, eikä se ollut itse työmaan kannalta tarpeellisia. Tämän

vuoksi mittausten tilaaminen ja suunnittelu jäi myöhäisemmäksi. Jätkäsaaren tarkkailumittausten yhteydessä myös urakoitsijan motivointi oli hankalaa, sillä työmaa oli jo käynnissä ja mittaukset tulivat jälkikäteen ylimääräisenä työnä (Andersson-Berlin 2013). Monitorointi tulisi siis suunnitella muun suunnittelun yhteydessä, jos mahdollista, jolloin ylimääräisiltä ongelmilta voitaisiin välttyä. Jätkäsaaren kohteessa Helsingin Sataman eli tilaajan olisi pitänyt tilata monitoroinnin suunnittelu aikaisemmin.

Laserkeilauksen etuna on sen soveltuvuus muutosten mittaamiseen laajoillakin alueilla ja mittauksesta saatava pistepilvi, jonka tiheys voidaan mitoittaa mittaushetkeen sopivaksi. Pistepilven avulla mittauksesta saadaan muodostettua käytännössä jatkuva pintamalli, mutta mittaustiedon paljous tekee tiedon käsittelystä raskasta. Kiinteästä sijainnista mitattaessa laserkeilaimen mittaushetket ovat paljolti samoja, kuin Suomessa tutumman takymetrin, mutta takymetri tuottaa aineistoa vain halutuista pisteistä. Mittaustiedon määrä on tällöin helpommin hallittavissa, mutta tietoa on saatavissa vain ennalta määrättyistä pisteistä. Liikkuva laserkeilain on käyttökohteiltaan huomattavasti perinteistä takymetriä laajempi, mutta interferometriaan perustuvat InSAR -menetelmät ovat ominaisuuksiltaan verrattavissa myös liikkuvaan laserkeilaimeen. Liikkuvissa laitteistoissa sijainnin määrittäminen perustuu tavallisesti GPS-paikannukseen, jonka tarkkuus on parhaimmillaankin senttiluokkaa. GPS:n tarkkuudesta johtuen menetelmän tuloksia voidaan pitää enemmänkin suuntaa-antavina ja osoituksena muutoksista. Mikäli sijainninmäärittäminen pystytään tekemään tarkemmin esimerkiksi referenssipisteiden avulla, niin menetelmän mahdolliset käyttökohteet laajentuisivat entisestään. Tällä hetkellä laserkeilaus on yksi harvoja menetelmiä, jolla pystytään mittaamaan laajoja alueita nopeasti ja järkevillä kustannuksilla. Lisäksi tulosten visualisointi on erittäin havainnollinen tapa muutosten osoittamiseen. Visuaalisten mallien avulla muutokset ja mahdollinen korjaustarve on helpompi perustella asiasta päättävälle taholle.

Diplomityötä varten tehdyn tutkimuksen ja diplomityön ohjausryhmän kommenttien perusteella on luotu monitorointimenetelmän valintaa ohjeistavat taulukot 5 ja 6. Taulukoiden tarkoituksena on auttaa suunnittelijoita monitorointimenetelmän valinnassa. Taulukosta 5 vaakariviltä valitaan rakennuskohteessa suoritettava toimenpide ja pystyriviltä saadaan luettua parametrit, joita on tavallisesti tarpeen mitata. Taulukko 6 ohjeistaa parametrin mittaamiseen soveltuvan menetelmän valinnassa. Menetelmiä on selvitetty tämän työn luvussa 6 ja liitteessä 1.

Taulukko 5. Maanrakennuskohteissa mitattavat parametrit.

Mittattava ongelma	Mittattava parametri	Pystysiirtymä	Vaakasiirtymä	Pohjavedenkorkeus	Huokosvedenpaine	Maanpaine	Voiman/jännytyksen mitta	Roudan syvyys	Tärinä (heilahdusnopeus ja kiihtyvyys)	Paalun kantokestävyys
Pohjaveden alennus		++		±	+					
Maarakenne pehmeiköillä		++		+	±					
painuma		+	++		+					
stabiliteetti										
Maarakenne Si, Mr		++						±		
Maarakenteen jäykkyys							+			
Tukiseinä			++			±				
Tukimuuri			±			+				
Ankkurointi							±			
Vettä pidättävät rakenteet				++	±					
Maapohjan										
vahvistamistoimenpiteet										
stabilointi		+	+							
pystyjoitus		++		+	++					
massanvaihto		++	±							
Paalutus		++	++		+				±	±

+ = soveltuu, ++ = soveltuu hyvin, ± = soveltuu toisinaan

9 Yhteenveto ja johtopäätökset

9.1 Yhteenveto

Monitorointia harkittaessa tulisi ensimmäisenä miettiä, voidaanko mittauksilla saada hankkeen kannalta hyödyllistä tietoa ja kuinka suuri lisäarvo mittauksilla voidaan saada suhteessa kustannuksiin. Käytettävissä olevilla menetelmillä tulee pystyä mittaamaan haluttua asiaa ja mittaustuloksista tulee olla hyötyä suunnittelun, rakentamisen tai rakenteen käytön aikana. Mittauksista mahdollisesti saatavien tuloksien hyödyllisyyttä tulee arvioida kriittisesti, sillä tuloksista jotka eivät vastaa alkuperäiseen tarpeeseen ei ole hyötyä.

Perinteisesti monitoroinnilla on pyritty pienentämään riskejä, etenkin rakentamisen aikana. Suunnitteluvaiheessa monitorointi on tällöin ylimääräinen kustannus ja siitä saavutettavaa hyötyä on hankala määrittää rahallisesti. Tällöin mittauksen laajuudesta ja niiden kustannuksista saatetaan yrittää tinkiä mahdollisimman paljon tai jättää mittaukset kokonaan tekemättä, jos se on mahdollista. Mittaukset tulisi pyrkiä toteuttamaan laadukkaasti mahdollisista kustannussäästöpainesta huolimatta. Monitoroinnilla voidaan säästää kokonaiskustannuksissa, mikäli sen avulla voidaan estää jonkin riskin toteutuminen.

Monitorointi on oleellinen osa ja edellytys seurantamenetelmän käytölle, jolla pyritään pienempien varmuuksien avulla kustannussäästöihin turvallisuutta vaarantamatta. Seurantamenetelmä on EN 1997-1 mahdollistama suunnittelumenetelmä haastavissa kohteissa. Menetelmässä rakenteen toimintaa seurataan mittauksin ja tarvittaessa ennalta laaditut vaihtoehtoiset suunnitelmat otetaan käyttöön.

Monitorointi tulisi mieltää osana rakennushankkeen suunnittelua ja rakentamisvaihetta, eikä erillisenä kokonaisuutena. Monitoroinnin hyödyt ja tarve tulisi miettiä ja määritellä riittävän aikaisin, jotta suunnittelun yhteydessä tarvittavat geotekniset mittaukset ja niiden edellytykset osattaisiin ottaa huomioon. Monitoroinnin suunnitteluun tulee myös varata aikaa, sillä hyvällä suunnittelulla on paremmat mahdollisuudet saada laadukkaita ja tarpeellisia mittaustuloksia. Monitoroinnin laatuun vaikuttaa myös mittauslaitteiden asennus, joka tulisi tehdä huolellisesti, ohjeiden mukaisesti ja kokeneen asentajan suorittamana. Mittauksiin liittyvien tehtävien vastuulliset tahot tulee määritellä selvästi sekä kaikkien asianosaisten tiedossa ja hyväksymiä.

Mittausten luotettavuuden ja toiminnan varmistamisen vuoksi on syytä käyttää useampaa mittauslaitetta. Selkeiden mittausvirheiden osalta virheelliset tulokset on helppo jättää huomiotta, mutta epäselvien virheiden kohdalla virheellisen mittauksen havaitse-

minen on vaikeampaa. Kahdella mittauslaitteella mitattaessa saavutetaan tavallisesti riittävä varmuus, mutta silti virheellisesti mittaavan laitteen määrittäminen voi olla hankalaa. Kolmella mittauslaitteella voidaan havaita vikaantuneet mittauslaitteistot, mutta samalla kustannukset kasvavat. Hyvä tapa on mitata muutosta kahdella eri mittaustavalla, joista toisen tulosta voidaan verrata johonkin vertailupisteeseen. Esimerkkinä tästä on inklinometriputken yläosan mittaaminen takymetrillä, jolloin takymetrillä voidaan mitata useampia inklinometriputkia tai kiintopisteitä ja näin varmistua molempien mittaustapojen toiminnasta. Vikaantuneet laitteet tulee korjata välittömästi kun vika on havaittu, jotta tulosten luotettavuus ei vaarannu.

Mittaustuloksista saatavissa oleva hyöty vaatii myös mittausten käsittelyä ja tulkintaa. Tuloksia tulisi tarkastella riittävän usein, jotta mahdolliset kehittyvät ongelmat havaitaan riittävän ajoissa. Tulkinnan vaativuus riippuu käytettävistä menetelmistä ja kohteen haastavuudesta, mutta tulkinnasta tulisi vastata viimekädessä kokenut geoteknikko. Mahdollisten hälyttävien tulosten ilmoittamiseen työmaalle olisi hyvä olla ennalta määritetty käytäntö. Tuloksia tarkasteltaessa tulee myös olla selvää, minkä suuruinen muutos on hyväksyttävissä. Automaattisten mittausjärjestelmien yhteydessä voi olla mahdollista asettaa hälytysrajat, joiden ylittyessä viesti tästä välitetään vastuuhenkilöille. Tällöin ongelmaksi voi muodostua se, että tuloksia ei tarkastella aktiivisesti, vaan ajatellaan, että hälytysrajojen ylittyessä tuloksia on vasta syytä tarkastella. Yleensä muutosten kehitys on nähtävillä jo ennen kuin hälytysrajat ylittyvät, jolloin pelkkä muutosten hidastaminen voi vielä olla riittävää.

9.2 Johtopäätökset

Suomessa monitorointi on vielä pienessä roolissa, eikä sitä pidetä tavallisesti tarpeellisina rakennushankkeissa. Tavallisesti käytettyjä mittausmenetelmiä on vain muutama, joista yleisimpiä ovat

- inklinometrit
- pohjavesi- ja huokospainemittarit
- roudan syvyyden mittaamiseen soveltuvat lämpötilamittarit
- vaaituskojeet ja takymetrit
- GNSS-satelliittipaikannus.

Mittauksista tulisi ymmärtää menetelmien rajoitukset ja niihin liittyvät oletukset. Monesti mittauslaitteista saatuihin tuloksiin luotetaan ja niitä käytetään. Mittaustulokset voivat olla oikein, mutta tulosten paikallisuus ja arvojen interpolointi tulee huomioida. Esimerkiksi automaatti-inklinometri mittaa paikallisia kulman arvoja, joka voi johtaa virheellisiin siirtymän arvoihin, jos paikallinen arvo poikkeaa anturivälin keskiarvosta. Pohjavesi- ja huokosvedenpainemittauksissa virhe voi johtua paineellisesta pohjavedes-

tä, joka oletetaan hydrostaattiseksi. Mittausten perusteella tehdyt laskelmat johtavat tällöin virheellisiin tuloksiin.

Suomessa mittauksilla tavallisesti varmistetaan rakenteen suunnitelmien mukainen toiminta, eikä mittauksilla pyritä vaikuttamaan rakenteeseen tai rakentamistapaan. Tarkkailumittauksia on tehty myös paljon tutkimuskäyttöä varten sekä tuloksista saatavan tiedon myöhempää hyödyntämistä varten. Monitoroinnin avulla saatuja tietoja voidaan usein hyödyntää vasta seuraavissa samankaltaisissa hankkeissa, kun rakenteen käyttäytyminen tunnetaan.

Seurantamenetelmällä voitaisiin saavuttaa nykyistä parempi kustannushyöty, mutta menetelmän käyttö vaatii sopivan kohteen, jossa suunnitelmien muuttaminen on tarvittaessa mahdollisia.

Monitorointi on Suomessa osin maailman kehityksen kärjessä, esimerkiksi automaattisten mittauslaitteiden osalta. Kuitenkin Suomi on osittain jäljessä muuta Eurooppaa, mutta osittain tätä selittää erilainen maa- ja kallioperä sekä osittain erilaiset rakenteet. Suomessa maaperän varaan rakentaminen on monesti mahdotonta, mutta kallioperän varaan rakentaminen toisaalta ongelmattonta, jolloin monitorointia ei tarvita. Maailmalla esimerkiksi patorakenteiden monitorointi on tavallista, mutta Suomessa tämän tyyppisiä rakenteita on verrattain vähän.

Nykyään monitoroinnin edistämisen suurin este on suunnittelijoiden vähäinen ymmärrys ja kokemus monitorointiin liittyen. Monitoroinnilla saatavat hyödyt pitäisi pystyä tuomaan suunnittelijoiden ja rakentajien tietoisuuteen, jolloin monitoroinnin tarve ja siitä saatavat edut ymmärrettäisiin paremmin. Tämä tarkoittaa myös mittausten poisjättämistä, mikäli niille ei ole tarvetta. Tarkkailumittauksia ei tule tehdä ilman erityistä perustetta ainoastaan sen takia, että jotain mittauksia pitäisi tehdä.

Lähdeluettelo

AASHTO. 2013. American Association of State Highway and Transportation Officials. <http://www.transportation.org/>. Käyty: 9.1.2013.

Alba, M. et al. 2008. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques. Teoksessa: Chen, J. & Jiang, J. & Baudoin, A. (toim.) The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. [Verkkodokumentti]. Vol. 37:B1. S. 133-139. [Viitattu 28.1.2013]. Saatavissa: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/23.pdf.

Arcus. 2013. Jätkäsaaren instrumentoidun putkipaaluponttiseinän mittaukset. Insinööri-toimisto Arcus Oy. Saatavissa: <http://www.arcus.fi/jatkasaari/index.html>. Käyty: 4.2.2013.

Arsenio, N. et al. 2009. Prediction, Monitoring and Evaluation of Performance of Geotechnical Structures. 17th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering. 76 s.

ASTM International. 2013. <http://www.astm.org/>. Käyty: 9.1.2013.

Berthelot, C. et al. 2010. Ground-penetrating radar evaluation of moisture and frost across typical saskatchewan road soils. Advances in civil engineering. [Verkkodokumentti]. Vol. 2010. 9 s. [Viitattu 30.1.2013]. Saatavissa: <http://downloads.hindawi.com/journals/ace/2010/416190.pdf>.

Bock, H. & Thaher, M. 2007. Towards European standards in performance monitoring of geotechnical structures. 7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics 2007. [Verkkodokumentti]. 12 s. [Viitattu 9.10.2012]. Saatavissa: http://www.cancercarecongress.com/_data/assets/pdf_file/0007/578527/European-Standards-in-Performance-Monitoring.pdf.

Brecciaroli, F. & Kolisoja, P. 2004. Stabilitteiltään kriittiset ratapenkereet. Esituskimus. Helsinki: Ratahallintokeskus. 107 s. + liit. 32 s. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_2004-a8_stabilitteiltaan_kriittiset_web.pdf. ISSN 1455-2604 ISBN 952-445-113-1.

CEN-WI 00341066. 2012. Geotechnical investigation and testing – Geotechnical monitoring by field instrumentation – General rules. Julkaisematon standardiluonnos. 31 s.

Destia. 2013. Valtatien 7 parannuksen monitorointiin liittyvää aineistoa.

DIN. 2012. Deutsches Institut für Normung. <http://www.din.de/>. Käyty 20.11.2012.

Dunnicliff, J. 1988. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. New York, USA: John Wiley & Sons. 577 s. ISBN 0-471-09614-8.

Dunnicliff, J. 2011. Standards and Eurocodes – some issues for authors to consider. 8th international symposium on field measurements in geomechanics 2011. [Verkkodokumentti]. 8 s. [Viitattu 9.10.2012] Saatavissa: http://www.cancercarecongress.com/_data/assets/pdf_file/0006/580488/Standards-and-Eurocodes.pdf.

FinMeas. 2013a. Mittaustietopalvelu. Saatavissa: <http://mittaukset.finmeas.com>.

FinMeas. 2013b. Raportti mäenkylän sivusiirtymälaitteiden mittadatan kohinasta - kohinan syy on löytynyt ja vika korjattu.

Geokon. 2009. Load cells. [Verkkodokumentti] 2 s. [Viitattu 2.8.2012]. Saatavissa: http://www.geokon.com/content/datasheets/4900_Load_Cells.pdf.

Geokon. 2011. Fibre optic temperature sensor. [Verkkodokumentti] 2 s. [Viitattu 10.12.2012]. Saatavissa: http://www.geokon.com/content/datasheets/FP4700_Fiber_Optic_Temperature_Sensor.pdf.

Geokon. 2012. Earth pressure cells. [Verkkodokumentti] 2 s. [Viitattu 17.01.2013]. Saatavissa: http://www.geokon.com/content/datasheets/4800_Series_Earth_Pressure_Cells.pdf.

Glisic, B. & Inaudi, D. 2007. Fibre optic methods for structural health monitoring. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons. 262 s. ISBN 978-0-470-06142-8.

Ilmatieteen laitos. 2012a. Ilmastokatsaus helmikuu 2012. [Verkkolehti]. 16 s. [Viitattu 8.3.2013]. Saatavissa: http://ilmatieteenlaitos.fi/c/document_library/get_file?uuid=01983ac8-d61a-4f3d-b289-81a501a8718d&groupId=30106. ISSN 1239-0291.

Ilmatieteen laitos. 2012b. Ilmastokatsaus maaliskuu 2012. [Verkkolehti]. 16 s. [Viitattu 8.3.2013]. Saatavissa: http://ilmatieteenlaitos.fi/c/document_library/get_file?uuid=e68cc037-29c1-4c2b-b8a9-e807ea6ef32a&groupId=30106. ISSN 1239-0291.

Ilmatieteen laitos. 2012c. Ilmastokatsaus huhtikuu 2012. [Verkkolehti]. 16 s. [Viitattu 8.3.2013]. Saatavissa: http://ilmatieteenlaitos.fi/c/document_library/get_file?uuid=087069be-5ead-41bb-be0c-efe3ca2c13d8&groupId=30106. ISSN 1239-0291.

InraRYL. 2010. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 1: Väylät ja alueet. Helsinki: Rakennustieto Oy. ISBN 978-951-682-958-9.

Joala, V. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. [Verkkodokumentti] 7 s. [Viitattu 21.3.2010] Saatavissa: <https://docs.google.com/file/d/0B3MfAq-wXowlN2Q4MzJlYjktZTA5Ni00ZGM5LTlkOWUtNTQzMdIwZTI3NDVm/edit?hl=en&pli=1>.

Kairausopas IV. 1987. Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. Helsinki: Rakentajain Kustannus Oy. 29 s. ISBN 951-676-337-5.

Kane W. F. & Beck T. J. 1999. Advances in slope instrumentation: TDR and remote data acquisition systems. Teoksessa: Leung, C. F. & Tan, S. A. & Phoon, K. K. (toim.) Proceedings of the 5th international symposium on field measurements in geomechanics. Singapore 1999. S. 101-105. ISBN 978-9058090669.

Kocierz, R. & Kuras, P. & Owerko, T. & Ortyl, Ł. 2011. Assessment of usefulness of radar interferometer for measuring displacements and deformations of dams. Joint international symposium on deformation monitoring. [Verkkodokumentti]. 7 s. [Viitattu 28.1.2013]. Saatavissa: <http://dma.lsgi.polyu.edu.hk/JISDM-Proceeding/Proceeding/Full%20paper/43.pdf>.

Korkiala-Tanttu, L. & Onninen, H. 2001. Tien rakennekerrostutkimukset. TPPT menetelmäkuvaus 13. Helsinki: Tiehallinto. 25 s. + liitt. 5 s.

Leica Geosystems. 2009. Leica TS30 - Technical Data. [Verkkodokumentti]. 16 s. [Viitattu 7.11.2012]. Saatavissa: http://www.leica-geosystems.fi/downloads123/zz/tps/TS30/brochures-datasheet/TS30_Technical_Data_en.pdf.

Liikennevirasto. 2011a. Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011. [Verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. 156 s. [Viitattu 10.4.2013]. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2011-10_radan_eristys_web.pdf.

Liikennevirasto. 2011b. Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuorituksen menetelmäkuvaukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/2011. [Verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. 24 s. [Viitattu 11.12.2012]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2011-06_siirtyma_ja_huokospainemittausten_web.pdf.

Liikennevirasto. 2013a. Liikennevirasto: E18 Koskenkylä–Kotka. http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/hankkeet/kaynnissa/koskenkyla_loviisa_kotka. Käyty: 6.3.2013.

Liikennevirasto. 2013b. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/2013. [Verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. 208 s. [Viitattu 11.4.2013]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2013-06_radan_pystysuuntainen_web.pdf.

Luomala, H. 2008. The continuous ground movement measuring system. Main conclusions of laboratory tests performed at Tampere University of Technology.

Luomala, H. 2010. Ratapenkereiden monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. [Verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. 80 s + liit. 10 s. [Viitattu 21.8.2012]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/idcprod/groups/public/@1702/@web/@p/documents/liit/p033600.pdf>. ISBN 978-952-255-543-4 ISSN 1798-6664.

Luomala, H. 2012a. Ankkuritangon instrumentointi. 3 s.

Luomala, H. 2012b. Jätkäsaaren laiturin instrumentointi. 12 s.

Maanmittauslaitos. 2012. Satelliittimittaus eli GPS-mittaus. <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus>. Käyty 11.10.2012.

Marr, W. A. 2007. Why monitor performance? Teoksessa: DiMaggio, J. & Osborn, P. (toim.) Seventh international symposium on field measurements in geomechanics 2007.

[Verkkodokumentti]. Virginia, USA: ASCE. S. 91-118. [Viitattu 13.1.2013] Saatavissa: <http://site.ebrary.com.libproxy.aalto.fi/lib/aalto/docDetail.action?docID=10475961>. ISBN 978-0-7844-0940-4.

MDT. 2008. Instrumentation. MDT geotechnical manual. Montana department of transportation. [Verkkodokumentti]. 20 s. [Viitattu 25.1.2013] Saatavissa: www.mdt.mt.gov/other/materials/external/geotech_manual/chapter11.pdf.

Munro, R. & MacCulloch, F. 2006. Turpeesta aiheutuvien ongelmien hallinta vähäliikenteisillä teillä, tiivistelmä. 34 s. [Viitattu 23.7.2012] Saatavissa: http://www.roadex.org/uploads/publications/docs-RII-S-FL/Roads%20on%20Peat_Finnish.pdf.

Naterop, D. 2002. Instrumentation of Geotechnical Structures and New Technologies of Information New Developments in Instrumentation and Data Management. 8th Portuguese National Congress on Geotechnical Engineering. [Verkkodokumentti]. 14 s. [Viitattu 14.1.2013]. Saatavissa: http://www.solexperts.com/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=670&lang=de.

National Instruments. 2012. Measuring Strain with Strain Gages. <http://www.ni.com/white-paper/3642/en>. Käyty: 8.8.2012

NDOT. 2005. Field instrumentation. Geotechnical policies and procedures manual. Nevada department of transportation. [Verkkodokumentti]. 15 s. [Viitattu 25.1.2013] Saatavissa: http://www.nevadadot.com/uploadedFiles/Geo_PPM_Chapter10.pdf.

ODOT. 2008. Guidelines for the use of geotechnical instrumentation. Ohio department of transportation. [Verkkodokumentti]. 41 s. [Viitattu 26.10.2012]. Saatavissa: http://www.dot.state.oh.us/Divisions/Engineering/Geotechnical/Geotechnical_Documents/GB4_Geotechnical_Instrumentation.pdf.

Omega Engineering. 2012. The strain gage. <http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html>. Käyty: 10.8.2012.

Onninen, H. 2001. Roudan syvyyden määrittäminen. TPPT menetelmäkuvaus 5. Espoo: Tiehallinto. 14 s. + liitt. 1 s.

Patel, D. 2005. Final Report - part 1: The observational method in geotechnics. Teoksessa: Huybrechts, N. (toim.) Workpackage 3. Innovative Design Tools in Geotechnics. 155 s. ISBN 90 3760 465 x.

Ratahallintokeskus. 2005. Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. [Verkkodokumentti]. 27 s. [Viitattu 11.4.2013]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_radantarkastusohjeita_raiteentarkastustulokset.pdf.

RIL 254-2011. 2011. Paalutusohje 2011. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 261 s. ISBN 978-951-758-528-6 ISSN 0356-9403.

Saarenketo, T. & Matintupa, A & Kourim, B. 2012. Experiences with new technologies in road problem diagnostics. 12 s. EPAM 2012: 4th European pavement and asset management conference.

Savolainen, M. & Halkola, H. 2001. Painuma-, sivusiirtymä- ja huokospainemittausten tarkkuus. Helsinki: Helsingin kaupunki. 81 s. Geoteknisen osaston julkaisut 83/2001. ISBN 951-718-837-4. ISSN 1458-2198.

Serma, A. I. A. & Setan, H. 2009. Ground penetrating radar (GPR) for subsurface mapping: preliminary result. Geoinformation Science Journal. [Verkkolehti]. Vol. 9:2. S. 45-62. [Viitattu 11.12.2012]. Saatavissa: [http://www.fksg.utm.my/journal/GSJ/PDF/GSJ%20VOL%209%20NO%202%202009/5%20-%20new%20-%20Ground%20Penetrating%20Radar%20\(GPR\)%20-%20Awangku%20Iswandy2.pdf](http://www.fksg.utm.my/journal/GSJ/PDF/GSJ%20VOL%209%20NO%202%202009/5%20-%20new%20-%20Ground%20Penetrating%20Radar%20(GPR)%20-%20Awangku%20Iswandy2.pdf). ISSN 1511-9491.

SFS-EN 1997-1. 2004. Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 155 s.

SFS-käsikirja 179-3. 2009. Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 3: Näytteenotto, pohjavesimittaukset ja yleisesti Suomessa käytettävät kenttäkokeet. Menetelmäkuvaukset soveltamisohjeineen 2009. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 203 s. ISBN 978-952-242-006-0 ISSN 0780-7961.

Slope Indicator. 2004. Guide to geotechnical instrumentation. [Verkkodokumentti]. Washington, USA. 50 s. Saatavissa: <http://www.slopeindicator.com/pdf/course%20material/guide-to-instrumentation.pdf>

Slope Indicator. 2009a. Digitilt inclinometer probe. [Verkkodokumentti]. 2 s. [Viitattu 25.10.2012]. Saatavissa: <http://www.slopeindicator.com/pdf/digitilt-vertical-inclinometer-probe-datasheet.pdf>.

Slope Indicator. 2009b. VW temperature sensor. [Verkkodokumentti]. 2 s. [Viitattu 10.10.2012]. Saatavissa: <http://www.slopeindicator.com/pdf/vw-temperature-sensor-datasheet.pdf>.

Slope Indicator. 2012. VW strain gauges. Saatavissa: <http://www.slopeindicator.com/instruments/sg-intro.html>. Käyty: 27.8.2012.

SCDOT. 2010. Construction monitoring and instrumentation. SCDOT geotechnical design manual. South Carolina department of transportation. [Verkkodokumentti]. 15 s. [Viitattu 25.1.2013]. Saatavissa: <http://www.scdot.org/doing/technicalPDFs/geotechnicalDesign/Chapter%2025%20Construction%20Monitoring%20and%20Instrumentation%20-%2004072010.pdf>.

TYL Pulteri. 2013. Pohjavahvistustöiden seurantamittaukset, Siltakylänjoki, loppuraportti. E18 Koskenkylä–Kotka. Luonnosversio 21.3.2013. 12 s.

USACE. 1995. Instrumentation of embankment dams and levees. Washington DC, USA: U.S. Army Corps of Engineers. 86 s. Saatavissa: http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM_1110-2-1908_sec/EM_1110-2-1908.pdf.

VR Track Oy Georyhmä. 2012. Vilhonkatu 13, Helsinki.

Haastatteluluettelo

Andersson-Berlin, K. 2013. Suunnittelija. Insinööritoimisto Arcus Oy. Linnankatu 16, 20100 Turku. Haastattelu 1.2.2013.

Halkola, H. 2012. Monitoroinnin standardoinnista ja ohjeistuksista. Sähköposti. 9.11.2012.

Halkola, H. 2013. Yksikön johtaja. Stara geopalvelu. Ilmalankuja 2 L, Helsinki. Haastattelu 8.3.2013.

Silvast, M. 2012. Ratakohde DI-työhön. Sähköposti. 11.12.2012.

Silvast, M. 2013. Office manager. RoadScanners Oy. Puhelinhaastattelu 15.3.2013.

Ylönen, S. 2013. TkT, Teknologiajohtaja. Finmeas Oy. Haastattelu 31.1.2013.

Liiteluettelo

Liite 1. Geoteknisessä monitoroinnissa tavallisesti käytetyt mittausmenetelmät. 8 sivua.
(CEN-WI 00341066 2012.)

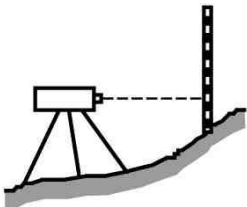
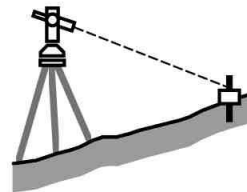
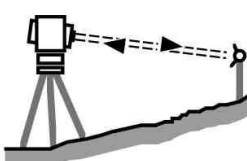
Liite 2. Mäenkylässä kiskosta mitattu painuma. 1 sivu. (VR Track Oy Georyhmä 2013.)

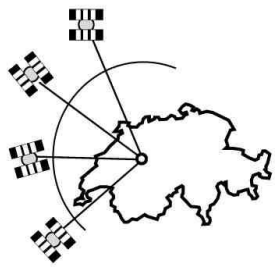
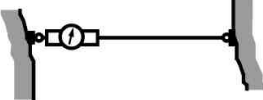
Liite 3. Maatutkaprofiili, jossa näkyvät eri rakennekerrosten rajapinnat. 1 sivu. (Silvast 2012.)

Liite 4. Jätkäsaaren putkiponttiseinän tarkkailumittausten suunnitelma kuva. 2 sivua.
(Arcus 2013.)

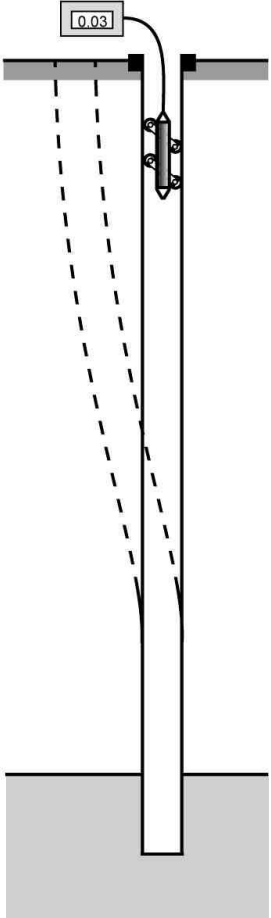
Liite 2. Geoteknisessä monitoroinnissa tavallisesti käytetyt mittausmenetelmät

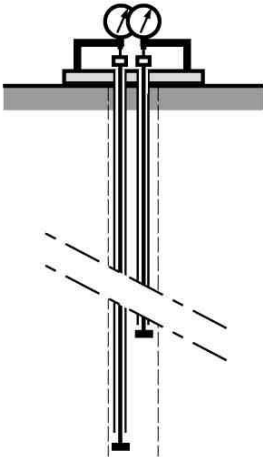
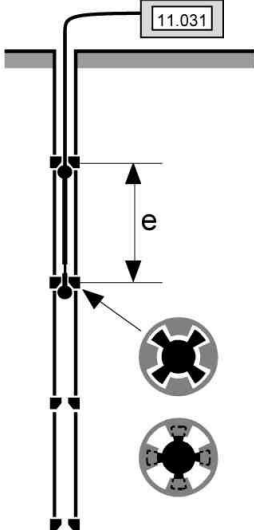
Taulukko 1. Maanpinnan siirtymien mittaaminen.

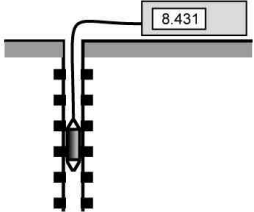
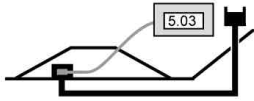
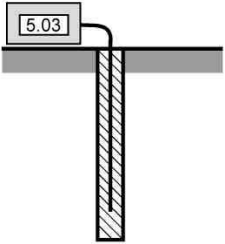
Mittauslaite Mitattava suure	Havainnekuva	Mittaus alue	Mittaus- tarkkuus	Huomiot
Vaaitus Tarkkavaaitus Δz		rajoittamaton	2 mm/0,5 mm (riippuen mittauspis- teiden järjestelyistä)	<ul style="list-style-type: none"> • Kiintopisteiden valinta tärkeää • Yksinkertainen käyttää • Heijastumat ongelmallisia • Automatisointi mahdollista
Takymetri $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ Δl epäsuorasti		rajoittamaton	1–5 mm (riippuen mittaus- etäisyydestä)	<ul style="list-style-type: none"> • Lukuisia käyttökohteita • Epäsuora mittaustulos (vaatii laskentaa) • Automatisointi mahdollista
Elektroninen etäisyys- mittari Δl		rajoittamaton	0,5–3 mm (riippuen mittaus- etäisyydestä)	<ul style="list-style-type: none"> • Heijastumat ja sääolot voivat aiheuttaa mittaus- virheitä • Automatisointi yksinkertaista • Käytetään usein yhdessä takymetrin kanssa

GPS-paikannus $\Delta x, \Delta y, \Delta z$		rajoittamaton	20 mm (kun mitataan 4 satelliittia käyttäen)	<ul style="list-style-type: none"> • Verrattain nopea mittaus • Sääoloista riippumaton • Vaatii useita vastaanottimia • Jyrkät maanpinnanmuodot ja muut esteet voivat vaikeuttaa mittaus
Invarteräslanka-etäisyysmittari Δl		100 mm	0,1 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Ei voi automatisoida • Tulosten luku mittauslaitteesta • Käytettävän invarlangan pituus riippuu mittausetäisyydestä • Mittauspisteiden väli $l = 1\text{--}20\text{ m}$

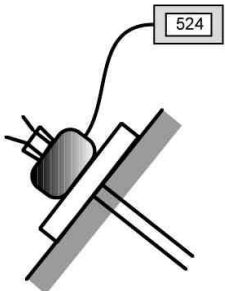
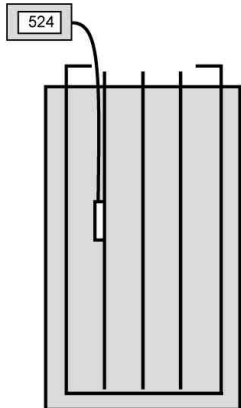
Taulukko 2. Maan tai rakenteiden sisässä tapahtuvien siirtymien mittaaminen.

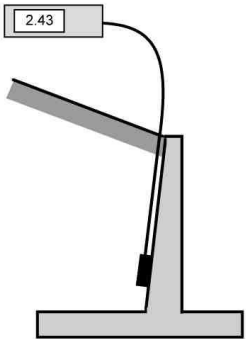
<p>Inklinometri</p> <p>$\Delta\alpha$</p>		<p>0–30° 0–90°</p>	<p>1–2 m / 10 m</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Luenta käsin manuaali-inklinometrillä • Automaattinen tiedonkeruu mahdollista kiinteillä kulma-antureilla • Vaakasuuntainen mittaus mahdollinen erillisellä laitteistolla • Inklinometriputkea ei tule käyttää pohjaveden korkeuden mittaamiseen • Inklinometriputken laatu on tärkeä • Putken kierteisyys tulee tarkastaa yli 50 m pituuksilla • Paikallinen taipuma voi vaikeuttaa inklinometrin käyttöä • Putken alaosa tulee asentaa useita metrejä oletettuun kovaan pohjaan • Inklinometriputken pään siirtymän mittaaminen takymetrillä
--	--	------------------------	---------------------	--

<p>Tankoekstensometri kairareikään</p> <p>Δl</p>		<p>50 mm venymää</p> <p>30 mm lyhenemää</p>	<p>0,1 mm</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kestävä • Manuaalinen tai automaattinen luenta • Mittauslaitteiston näkyvä osa suojattava • Mittausalueen asemointi mahdollista
<p>Siirrettävä ekstenso- metri (kaksipistemitta- us)</p> <p>(siirtymien mittaus mit- tausputkesta mitan e välein)</p> <p>Δl</p>		<p>5–100 mm</p>	<p>0,005–0,1 mm/m</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mekaanis-elektroninen tai induktioon perustuva mittaus • Vaiheittainen mittaus kahden peräkkäisen mittauskohdan välillä • Mittausalue ja -tarkkuus riippuvat mittauslaitteistosta • Mittausaluetta rajoittaa mittausputken pitkittäis-suuntainen jäykkyys

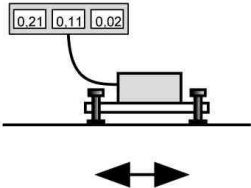
Painumamittari (siirrettävä yksipiste ekstensometri) Δl		30–50 mm/m	3–5 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Mekaaninen tai magneettinen mittaus • Suurille painumille • Etäisyysmittaus suhteessa kiintopisteeseen maanpinnalla
Painumaletku paineanturilla Δz		rajoittamaton	5–10 mm (painemittarin 0,1 % mittaus-alueesta)	<ul style="list-style-type: none"> • Painetta verrataan referenssikorkeuden ja mittauskohdan välillä • Automaattinen tiedonkeruu mahdollista
Valokuituun perustuva ekstensometri Δz		1 % valokuidun mittauspituudesta	0.01 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Kehitteillä

Taulukko 4. Voimien ja jännitysten mittaaminen.

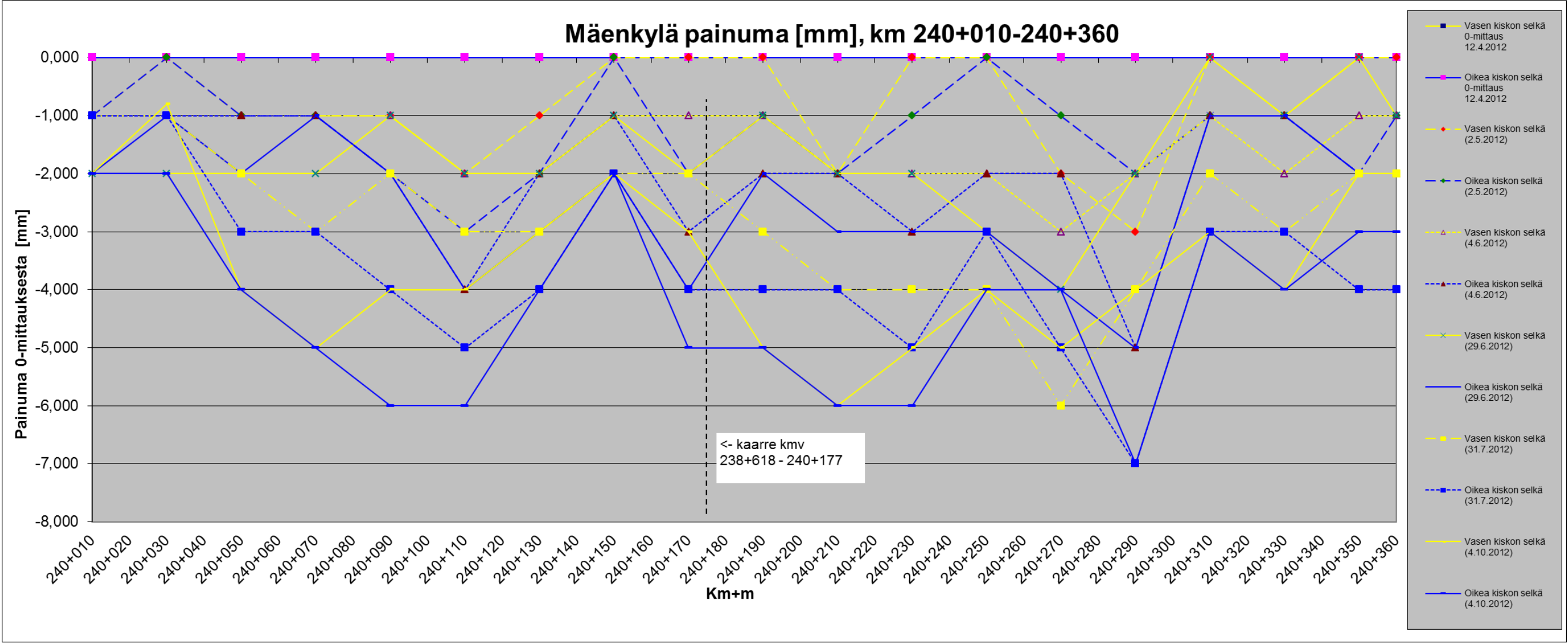
Voima-anturi Load cell F		100–5000 kN	1 % mittausalueesta	<ul style="list-style-type: none"> • Usean tyyppisiä: <ul style="list-style-type: none"> ○ Hydraulinen ○ Sähköinen (venymäliuska-anturi) ○ Mekaaninen ○ Värähdyslanka-anturi • Automaattinen tulosten keruu
Venymäliuska-anturi F		100–5000kN	1 % mittausalueesta	<ul style="list-style-type: none"> • Kiinteä asennus rakenteeseen • Useita mittausperiaatteita käytössä (sähköinen venymäanturi, värähdyslanka) • Voima tai jännitys lasketaan mitatusta muodonmuutoksesta (materiaalin kimmomoduuli tarvitaan) • Värähdyslanka-anturiin perustuvat mittarit ovat suositeltavia pitkäaikaisessa mittauksessa • Automaattinen mittaus mahdollista • Yleensä yhdistetään muihin mittauksiin

Maanpaineanturi σ_n		< 35 MPa	1–2 % Mittausalueesta	<ul style="list-style-type: none"> • Maanpaineen mittaus • Mittaustarkkuus vaihtelee merkittävästi
---	---	----------	-----------------------	--

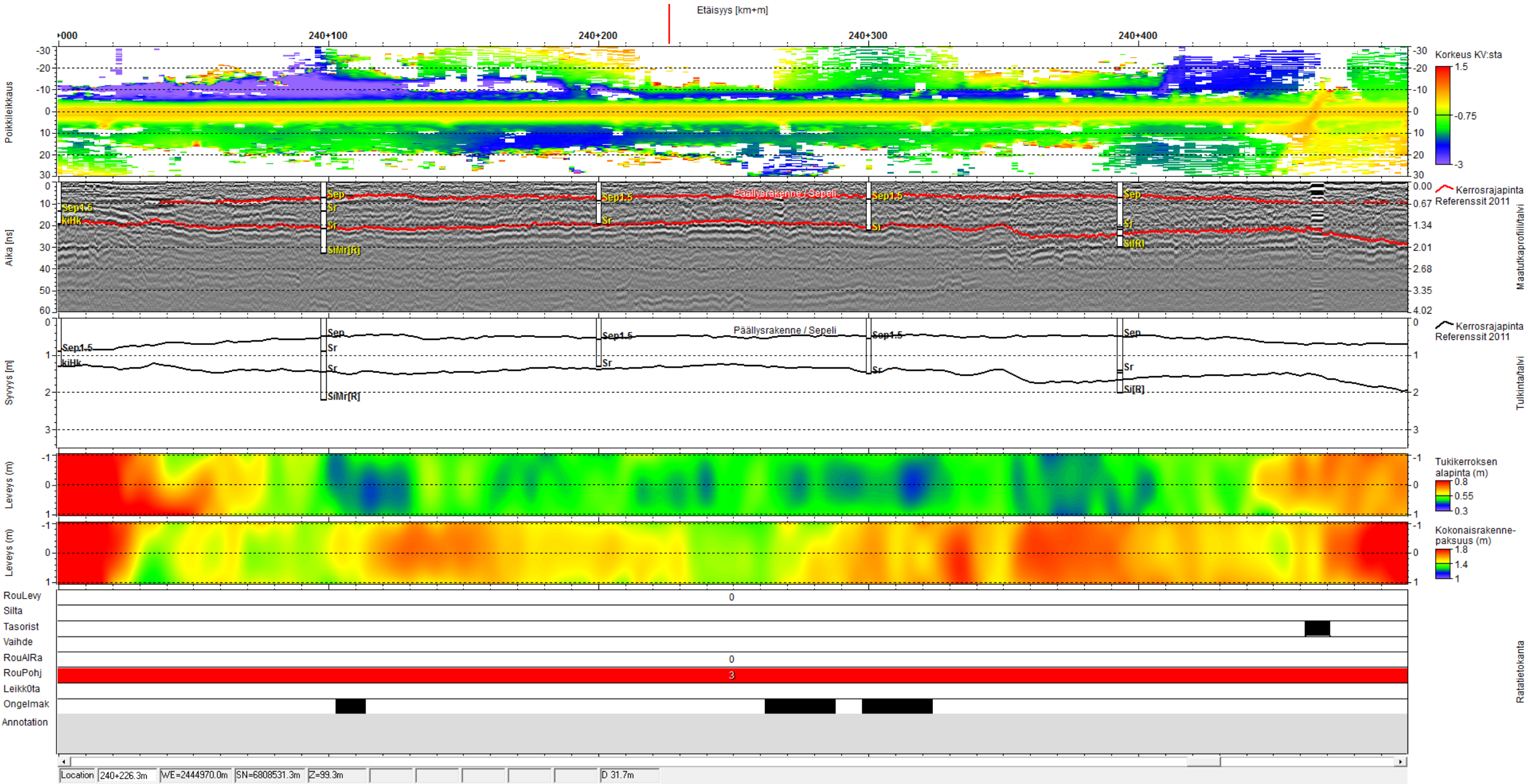
Taulukko 5. Tärinän mittaaminen.

Kiihtyvyysanturi Geofoni nopeus kiihtyvyys		-	Värähtely <ul style="list-style-type: none"> • Kiihtyvyys: 0,1 m/s² • Nopeus: 0,01 mm/s • Siirtymä: 10 μm 	<ul style="list-style-type: none"> • Rakennustöiden vaikutusten todentaminen • Tulosten perusteella voidaan ennakoida halkeamien muodostumista • Vaatii automaattisen tiedonkeruun
---	--	---	---	---

Liite 2. Mäenkylässä kiskosta mitattu painuma



Liite 3. Maatutkaprofiili, jossa näkyvät eri rakennekerrosten rajapinnat



Liite 4. Jätkäsaaren putkiponttiseinän tarkkailumittausten suunnitelmakuva

